

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

PPGECiv – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço:
revisão da literatura e avaliação de modelos analíticos**

Murilo Henn Gazoni

São Carlos

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

PPGECiv – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço:
revisão da literatura e avaliação de modelos analíticos**

Murilo Henn Gazoni

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Silvana De Nardin

Coorientadora: Profa. Dra. Margot Fabiana Pereira Milani

São Carlos

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Murilo Henn Gazoni, realizada em 18/05/2022.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Silvana de Nardin (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo (UFG)

Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel (PUCCAMP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

*“Carry on, my wayward son
There'll be peace when you are done”*
Kansas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mario e Marta, pelo apoio incondicional em todos os meus sonhos, não medindo esforços para que eu realizasse essa pós graduação mesmo em um período tão difícil de pandemia.

À minha irmã, Marcela, pelo companheirismo e paciência demonstrados ao longo de tantas e tantas horas que estudamos juntos. Obrigado por me inspirar a sempre dar o meu máximo.

À minha orientadora, Professora Dra. Silvana De Nardin, por toda paciência, ensinamentos e disponibilidade desde o início do desenvolvimento deste trabalho. Em especial, pela compreensão e confiança demonstrada ao longo dos últimos dois anos.

À minha coorientadora, Professora Dra. Margot F. P. Milani, que do mesmo modo esteve sempre à disposição para todas as minhas dúvidas. Obrigado pela paciência e contribuição fundamental em todas as etapas durante o trabalho.

As amizades construídas no mestrado, que mesmo com toda distância imposta pela pandemia tornaram essa caminhada mais leve.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional durante a fase das disciplinas.

Finalmente, a Deus e meu Santo Anjo da Guarda que tenho certeza esteve comigo durante todo o tempo.

RESUMO

GAZONI, M. H. **Concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço: revisão da literatura e avaliação de modelos analíticos.** 2022. 109p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

O desenvolvimento de novas tecnologias do concreto tem se acelerado nos últimos anos, aliando desempenho e demanda por sustentabilidade. Assim sendo, o desenvolvimento de um concreto reforçado com fibras de aço e produzido com substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado se enquadra neste contexto. Em razão da natureza mais porosa e do processo de trituração que origina o agregado reciclado, a utilização das fibras de aço na mistura atenua os efeitos negativos associados à presença do agregado reciclado no concreto, dando origem ao concreto reciclado reforçado com fibras de aço. Haja visto que as discussões acerca deste tipo de concreto são um campo relativamente novo, o objetivo principal deste estudo foi descrever o atual estado do conhecimento, fornecendo uma visão geral do comportamento mecânico, contemplando os efeitos do agregado reciclado e das fibras na trabalhabilidade e na resistência do concreto. Para isso, uma revisão sistemática sobre concreto reciclado reforçado com fibras de aço foi realizada; foram selecionados os estudos que contemplassem o uso do agregado reciclado, fibras de aço e avaliassem o comportamento resistente do concreto. Uma vez selecionados os documentos que se adequavam ao escopo do estudo, os principais achados sobre a influência do agregado reciclado combinado à fibra de aço na resistência do concreto à compressão e tração, módulo de elasticidade e trabalhabilidade do concreto reciclado reforçado com fibras de aço foram apresentados e discutidos. A presença do agregado reciclado causa redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto; para substituições acima de 50% os efeitos são mais acentuados. Por sua vez, a incorporação das fibras de aço promove redução na trabalhabilidade da mistura, significativo aumento na resistência à tração e, indiretamente, aumento da resistência à compressão do concreto. O uso de adições minerais e concretos autoadensáveis também se mostraram benéficos para aumento na resistência à compressão e melhoria na trabalhabilidade do concreto, respectivamente. A revisão sistemática também mostrou que modelos analíticos para previsão de propriedades mecânicas deste tipo de concreto se baseiam na resistência do concreto de referência, no volume de agregado reciclado e de fibras de aço incorporadas à mistura. Os modelos encontrados permitiram estimar a resistência à compressão e à tração bem como o módulo de elasticidade de concretos reciclados reforçados com fibras de aço. Os valores previstos foram comparados a valores disponíveis na literatura. Os valores de resistência à compressão previstos apresentaram boa correlação com os valores experimentais, enquanto a resistência à tração foi superestimada pelo modelo analítico.

Palavras-chave: concreto reciclado; agregado reciclado de concreto; concreto reforçado com fibras; fibras de aço; modelo analítico.

ABSTRACT

GAZONI, M. H. **Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete: literature review and evaluation of analytical models** 2022. 109p. Dissertation (Master Degree), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

The development of new concrete technologies has accelerated in recent years, combining performance and demand for sustainability. Therefore, the development of a steel fiber reinforced concrete and produced with replacement of the natural coarse aggregate by recycled aggregate is perfectly suited to this context. Due to the more porous nature and crushing process that originates the recycled aggregate, the use of steel fibers in the mixture mitigates the negative effects due to the presence of recycled aggregate in concrete, creating the steel fiber reinforced recycled concrete. Considering that discussions about this type of concrete are a relatively new field, the fundamental objective of this study was to describe the current knowledge on the subject, providing an overview of its mechanical behavior, contemplating the effects of recycled aggregate and fibers on workability and concrete strength. A systematic review on recycled concrete reinforced with steel fibers was carried out; studies about the use of recycled aggregate, steel fibers and evaluated the resistant behavior of concrete were selected. Once the references that fit the scope of this study were selected, the main findings on the influence of recycled aggregate combined with steel fiber on the compressive and tensile strength of concrete, modulus of elasticity and workability of recycled concrete reinforced with steel fibers were presented and discussed. The presence of recycled aggregate causes a reduction in the compressive strength and elasticity modulus of concrete; for substitutions above 50% the effects are more pronounced. Also, the incorporation of steel fibers promotes a reduction in the workability of the mixture, a significant increase in the tensile strength and, indirectly, an increase in the compressive strength of the concrete. Mineral additions and self-compacting concretes were also beneficial for increasing compressive strength and improving concrete workability, respectively. The systematic review also revealed that analytical models for predicting the mechanical properties of this concrete are based on the strength of the reference concrete, volume of recycled aggregate and volume of steel fibers incorporated into the mixture. The models found allowed estimating the compressive and tensile strength as well as the elastic modulus of steel fiber reinforced recycled concrete. The predicted values were compared to values available in the literature. The predicted compressive strength was in agreement correlation with the experimental values, while the tensile strength was overestimated by analytical model.

Keywords: recycled concrete; recycled aggregate concrete; fiber reinforced concrete; steel fiber; analytical model.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	8
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 METODOLOGIA.....	14
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	17
CAPÍTULO 2: CONCRETO RECICLADO	18
2.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO.....	18
2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO EM ESTADO FRESCO	22
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO EM ESTADO ENDURECIDO.....	24
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS	30
CAPÍTULO 3: CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO	32
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	32
3.2 COMPORTAMENTO DO CRFA.....	36
3.3 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO	39
3.4 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO	40
3.5 COMENTÁRIOS FINAIS	43
CAPÍTULO 4: CONCRETO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO ..	45
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	45
4.2 PROPRIEDADES DO CRRFA EM ESTADO FRESCO.....	48
4.3 PROPRIEDADES DO CRRFA EM ESTADO ENDURECIDO.....	52
4.3.1 Comportamento sob compressão	52

4.3.2	Comportamento sob tração	62
4.4	COMENTÁRIOS FINAIS	71
CAPÍTULO 5: MODELOS PARA PREVISÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CRRFA.....		73
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	73
5.2	DESCRIÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS	74
5.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	77
5.4	PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	85
5.5	PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	88
5.6	COMENTÁRIOS FINAIS	94
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES		96
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS		99

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto é notoriamente reconhecido como o material mais utilizado pela construção civil em todo o mundo. Isto se deve, principalmente, à sua boa resistência à compressão e à grande diversidade de aplicação, podendo ser dosado de acordo com as necessidades específicas de cada edificação e para atender aos requisitos de resistência e durabilidade desejados. Neste sentido, fomentado por motivações associadas a requisitos de maior resistência e, principalmente, soluções que atenuem a crescente demanda por recursos não renováveis, o desenvolvimento de concretos especiais abriu novas possibilidades de estudo e aplicação do concreto na Engenharia Civil.

Na construção civil, a enorme produção de resíduos de construção e demolição (RCD) - compostos principalmente por concreto, argamassa e resíduos cerâmicos – se tornou um grande problema ambiental, principalmente no que compete à disposição adequada destes resíduos. A geração de resíduos não está associada somente à demolição, mas a todas as fases da construção civil, seja na etapa de construção com os desperdícios de materiais ou na manutenção, quando ocorre substituição e descarte de materiais. Tendo como base o panorama mais atualizado sobre a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, fornecido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2020 foram coletados pelos municípios cerca de 47 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (uma média de 221,2kg por habitante/ano), o que representa um crescimento de 5,5% em relação ao relatório anterior. Neste sentido, tendo como pano de fundo as recorrentes e necessárias discussões acerca da preservação do meio ambiente, bem como a urgente necessidade de prover uma destinação adequada a essa massiva quantidade de resíduos de construção e demolição produzida anualmente no Brasil, a reciclagem do RCD surge como alternativa para mitigar os impactos ambientais.

Os agregados provenientes da trituração de resíduos podem ser utilizados na produção do concreto reciclado, em substituição ao agregado gráudo natural (brita). Entretanto, considerando a heterogeneidade dos componentes do RCD, a utilização exclusiva dos resíduos de materiais cimentícios (concretos e argamassas), com menos impurezas (cerâmicas, madeira, gesso, etc.) permite obter agregados reciclados mais adequados à produção de concretos

estruturais. Esta seleção prévia possibilita a produção do agregado reciclado de concreto (ARC), ou simplesmente *agregado reciclado* (como será utilizado ao longo do texto). Assim, o correto manejo dos resíduos de concreto, por meio do seu reuso/reciclagem promove múltiplos benefícios sociais e ambientais, uma vez que a substituição, no concreto, do agregado natural pelo reciclado reduz a extração de recursos naturais não renováveis do meio ambiente. Além disso, a reinserção de parte dos resíduos na construção civil reduz o volume de material depositado nos aterros sanitários aumentando sua vida útil

O emprego do agregado reciclado na produção do concreto é um fato consolidado na Europa, com os primeiros registros de utilização datados da década de 1940 com os esforços de reconstrução do continente europeu arrasado pela 2ª guerra mundial. Anos depois, entra em vigor na Holanda a norma “CUR – Betonpuingranulaaten als roeslgs materiaal vor beton”, que estabelecia as diretrizes para utilização do agregado reciclado na produção de novos concretos. Atualmente na Itália, a NTC (2008) autoriza a utilização de até 30% de agregados reciclados em novos concretos. No Brasil, as regulamentações técnicas ANBT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2021) permitem o emprego do agregado reciclado, respectivamente, para obras de pavimentação viária e concretos estruturais com até 20% de substituição do agregado gráudo natural por agregado reciclado de concreto.

Por essa razão, ainda não há registro no Brasil de edifícios que tenham utilizado o concreto reciclado em seus elementos estruturais, apenas para os fins regulamentados nas normas citadas. Por exemplo, na Arena Itaquera foram utilizados agregados reciclados oriundos de resíduos de demolição do Estádio Palestra Itália. Tais agregados foram empregados na confecção do concreto dos calçamentos e pavimentos de estacionamento. Por sua vez, no exterior há diversos exemplos de edificações construídas com concreto estrutural reciclado. Na Alemanha, o edifício de apartamentos “*Waldspirale*” localizado em Darmstadt (Figura 1.1a) utilizou o agregado reciclado de concreto na estrutura de seus 12 pavimentos. O concreto reciclado atingiu resistência média de 52,3 MPa em uma mistura que originalmente previa classe de resistência C25. Outro exemplo, o “*Samwoh eco-green building*”, em Singapura (Figura 1.1b), fez parte de um projeto de fomento ao uso do agregado reciclado na construção civil financiado pelo Ministério de Desenvolvimento Nacional de Singapura e contou com participação da Universidade Tecnológica de Nanyang, onde todo o concreto utilizado na estrutura foi produzido com 100% de agregados reciclados (SILVA, RUI VASCO *et al.*, 2018).

Figura 1.1 – Waldspirale (a) e Samwoh Eco-Green Building (b)

Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2018)

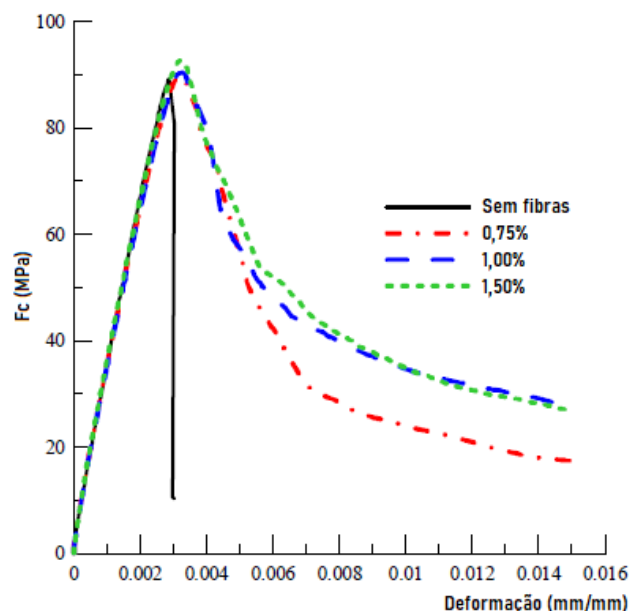
Atualmente, de acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolições (ABRECON), existem 350 usinas de reciclagem mapeadas no país e que reciclam resíduos de construção e demolição. Porém, a dificuldade logística entre os pontos de coleta e o beneficiamento dos resíduos dificultam e retardam a difusão do agregado reciclado na construção civil no Brasil. Entretanto, ainda que reconhecidamente o agregado reciclado seja mais poroso e interfira no comportamento do concreto reciclado, diversos estudos apontam a viabilidade de utilização deste tipo de agregado na produção de concretos com fins estruturais, indicando alternativas como o emprego de adições minerais ou o reforço com fibras para contornar essa fragilidade.

Especificamente, o concreto reforçado com fibras (CRF) nada mais é do que um compósito cimentício que contém reforço de fibras dispersas na mistura. O concreto simples possui um comportamento notoriamente frágil e baixa capacidade de deformação quando submetido a tração e, por essa razão, sua combinação mais comum é com barras de aço, no concreto armado, em que estas atuam resistindo às tensões de tração. Entretanto, por motivos diversos, o emprego de barras de aço em componentes estruturais pode não ser a mais adequada em todas as situações, fazendo surgir alternativas à composição com armadura de aço como a utilização de fibras como reforço à matriz cimentícia. O uso de material descontínuo como reforço em compósitos construtivos é antigo, com referências ao uso de palha e pelagem de animais na fabricação de tijolos no Egito antigo. Avançando para os tempos contemporâneos, o uso de pregos e segmentos de arame no concreto são reportados no início do século XX. Atualmente, a adição de fibras sintéticas derivadas de materiais como vidro, poliuretano e aço ao concreto é uma técnica recorrente para alterar algumas propriedades do material. No mercado brasileiro, a fibra de aço assume o protagonismo de ser a mais utilizada como reforço para o concreto devido, principalmente, à superioridade das propriedades mecânicas conferidas

pelo aço em relação a outros materiais alternativos. Pisos industriais, concreto projetado e indústria de pré-fabricados respondem quase que integralmente pela aplicação da fibra de aço como reforço no Brasil (FIGUEIREDO, 2011).

A opção pela fibra como alternativa para contornar as fragilidades do concreto submetido à tração se justifica com a comprovada melhora no seu desempenho mecânico em termos de resistência e ductilidade se comparado ao concreto simples, resposta que é relatada em diversas pesquisas (ALI *et al.*, 2021; GHORPADE; SUDARSANA RAO, 2010; KANNAM; RAO SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; MOHSENI *et al.*, 2017; NAZARIMOFRAD; SHAIKH; NILI, 2017; QURESHI; ALI; ALI, 2020; SENARATNE *et al.*, 2016; SU, 2020). Essa mudança de comportamento é creditada ao “efeito ponte”, que proporciona a transferência de tensões entre as regiões fissuradas de concreto e possibilita, assim, que o material continue resistindo às tensões sem que ocorra ruptura abrupta, conferindo ao concreto uma capacidade maior de se deformar. Ao contrário da rápida queda de resistência apresentada pelo concreto simples após o surgimento da primeira fissura, o concreto reforçado com fibras possui considerável resistência pós fissuração devido à costura realizada pelas fibras na região da falha (Figura 1.2.).

Figura 1.2 – Comportamento à compressão do concreto sem reforço e com 0,75; 1,00 e 1,50% de fibras de aço



Fonte: adaptado de Liao *et al.* (2015)

No mecanismo de ruptura do concreto, quando ocorre uma fissura na matriz cimentícia, instantaneamente surge uma tendência de concentração de tensões nas extremidades

desta falha. Isto desencadeará um processo de microfissuração progressiva até que haja a falha completa do concreto. A presença das fibras como reforço junto à matriz atenua esta concentração de tensões nas bordas da fissura, reduzindo a velocidade de propagação da falha e conferindo comportamento pseudo-dúctil ao compósito.

Considerando que o agregado reciclado de concreto se diferencia do agregado natural primordialmente em razão da maior porosidade atribuída aos resquícios de argamassa remanescentes do processo de trituração do concreto para sua produção, esta parcela de argamassa é mais suscetível ao desenvolvimento e propagação de fissuras. Ainda que a presença da fibra não interfira nas propriedades internas do agregado, considerando que a costura das fibras irá retardar a propagação da fissuração na matriz cimentícia, sua incorporação no concreto reciclado pode contribuir com um ganho de ductilidade ao material como um todo.

Apesar de estar pautado nos diversos benefícios no âmbito sustentável e técnico promovidos pelo emprego do concreto reciclado reforçado com fibras de aço, há uma grande variabilidade nos resultados disponíveis na literatura científica, sobretudo quanto aos efeitos ocasionados pela substituição do agregado reciclado combinado ao reforço com fibras. Essa variabilidade se deve justamente às diversas possibilidades de combinação e concentração do agregado reciclado e das fibras. Dessa forma, este estudo pretende contribuir com uma visão ampla sobre as principais tendências e achados disponíveis na literatura para a combinação do concreto reciclado com as fibras de aço.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal fornecer um consistente panorama sobre o concreto reciclado reforçado com fibras de aço (CRRFA), indicando os principais achados quanto ao desempenho deste tipo de concreto nos estados fresco e endurecido, com ênfase para resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade. Além do objetivo principal que direcionou esse estudo, com base nas observações encontradas sobre o CRRFA, almeja-se englobar os objetivos específicos a seguir:

- Identificar quais teores de agregado reciclado e de fibras de aço são mais empregados para o concreto reciclado reforçado com fibras de aço;
- Identificar formas de prever algumas propriedades mecânicas do concreto reciclado reforçado com fibras de aço como resistências à compressão e tração e módulo de elasticidade;

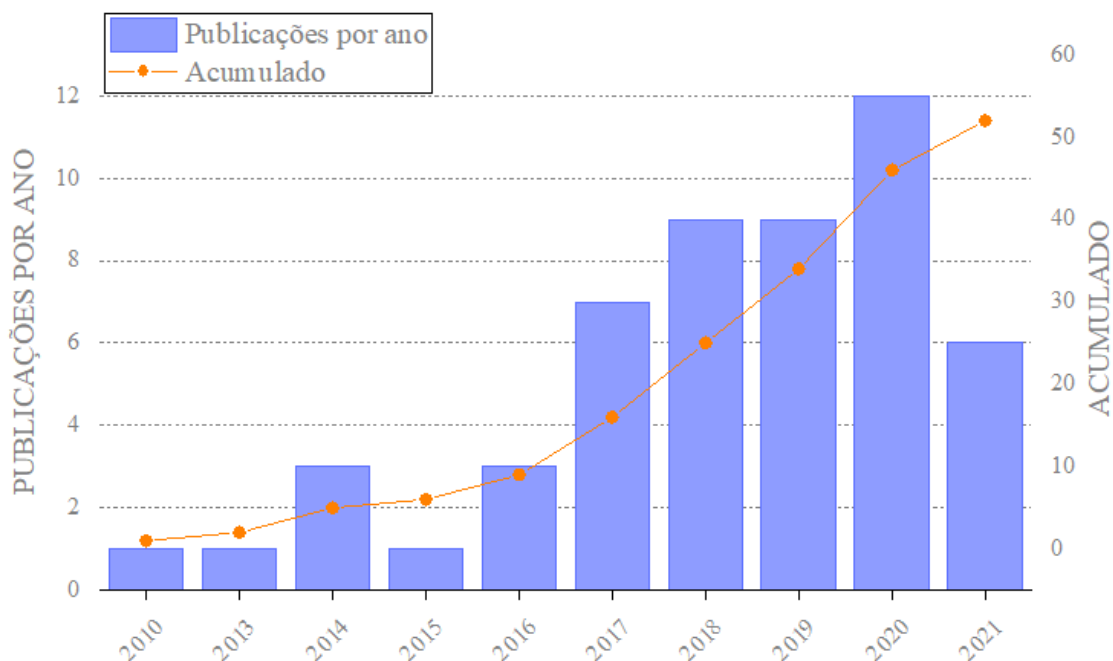
- Identificar quais parâmetros do concreto reforçado com fibras de aço interferem nas propriedades mecânicas de resistência a tração, compressão e módulo de elasticidade;
- Avaliar se modelos analíticos disponíveis na literatura conseguem prever, de forma adequada, os valores de resistência a tração, compressão e módulo de elasticidade de concretos reforçados com fibras de aço.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de concretos especiais tem se acelerado nas últimas décadas. A necessidade de materiais cada vez mais resistentes, aliada às recorrentes discussões relacionadas ao desenvolvimento sustentável têm intensificado estudos para o desenvolvimento de tecnologias que possam combinar desempenho e sustentabilidade.

No âmbito da construção civil, o grande volume de resíduos gerados e sua destinação são focos de discussão no âmbito social e ambiental. De acordo com o relatório publicado pela ABRELPE em 2021, a coleta de resíduos de construção e demolição (RCD) saltou de 33 milhões de toneladas, em 2010, para 45,5 milhões de toneladas, em 2019 e 47 milhões de toneladas em 2020, um aumento de 42% num período de apenas 10 anos. A reutilização de parte dos resíduos de construção civil para produção de agregados reciclados se adequa ao contexto ambiental e, mais do que isso, ao ser utilizado como substituição do agregado natural, se apresenta como alternativa viável de desenvolvimento sustentável da Engenharia Civil. Quando combinado com o reforço de fibras, o concreto reciclado reforçado com fibras de aço alia inovação tecnológica com sustentabilidade e, por essa razão, têm atraído o crescente interesse da comunidade acadêmica (Figura 1.3).

Figura 1.3 – Estudos disponíveis na literatura sobre o comportamento do CRRFA



Neste sentido, considerando o número de documentos científicos publicados na última década sobre o comportamento mecânico do concreto e, principalmente, a ausência de documentos que reúnam as informações disponíveis na literatura científica, a produção de uma revisão consistente que agrupe e pontue os principais achados sobre o concreto reciclado reforçado com fibras de aço se faz necessária.

Prever, com precisão adequada, as principais características mecânicas do concreto é de fundamental importância para a aplicação do concreto reciclado reforçado com fibras de aço. A estimativa de propriedades mecânicas do concreto por meio de expressões analíticas pode ser utilizada, por exemplo, para prever a resistência do concreto reciclado. Desse modo, inserido no contexto do concreto reciclado reforçado com fibras de aço, é de grande valia a investigação de modelos de previsão que estimem com razoabilidade o desempenho resistente do CRRFA.

Deste modo, além de localizar a comunidade científica em relação à fronteira do conhecimento sobre o concreto reciclado reforçado com fibras e aço, o presente estudo fornecerá subsídios para a definição de estudos futuros voltados a esta temática.

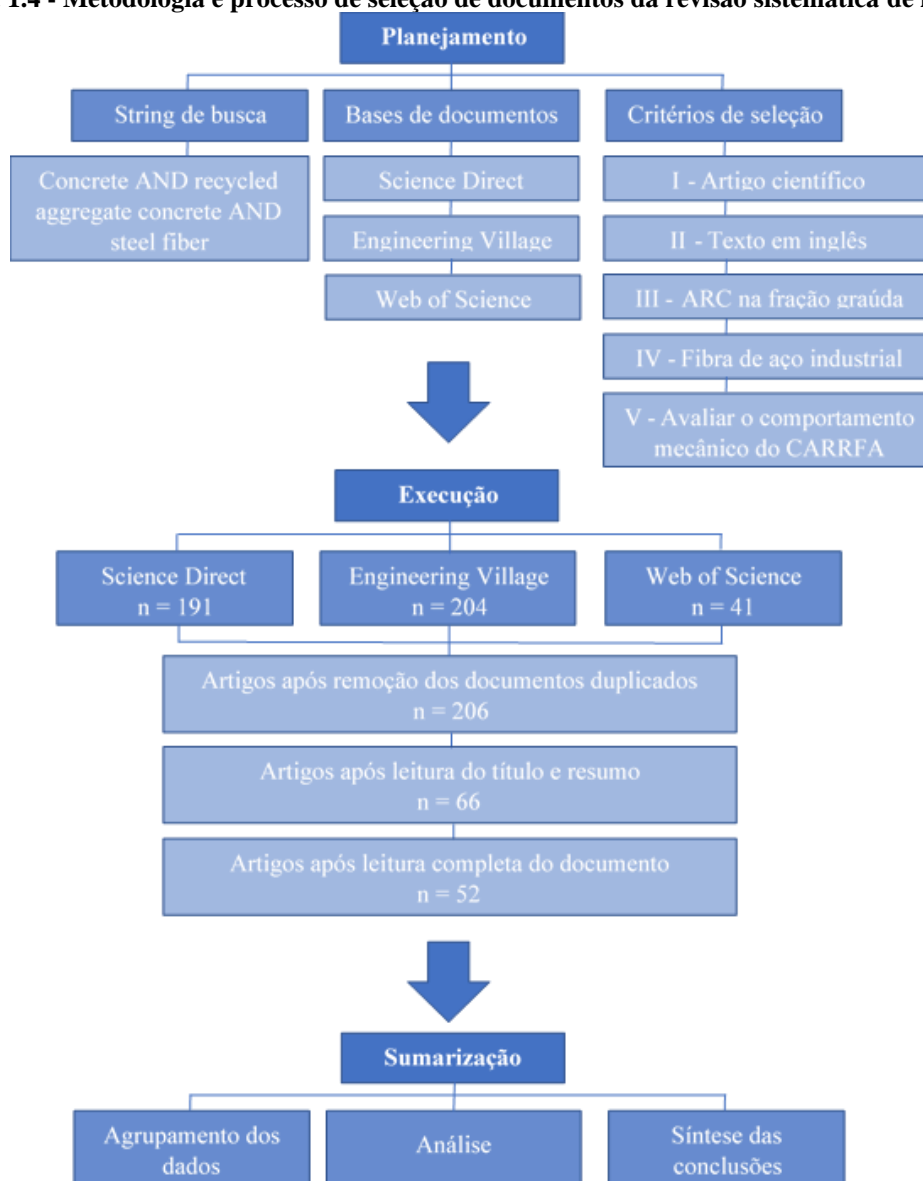
1.4 METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos descritos anteriormente, a metodologia para realização deste estudo foi dividida em duas frentes principais: 1) revisão sistemática de literatura e 2)

identificação de modelos analíticos para estimativa de propriedades resistentes do concreto reciclado reforçado com fibras de aço e aplicação destes modelos a dados extraídos da literatura.

Na primeira frente, utilizando o software de revisão sistemática StArt, desenvolvido pelo LaPES – Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software –da UFSCar, foi realizada a busca, seleção e classificação de documentos cujo foco é a avaliação de propriedades mecânicas do concreto reciclado reforçado com fibras - CRRFA. A estrutura metodológica e a sequência de etapas realizadas na revisão sistemática de literatura são ilustradas no fluxograma da Figura 1.4.

Figura 1.4 - Metodologia e processo de seleção de documentos da revisão sistemática de literatura

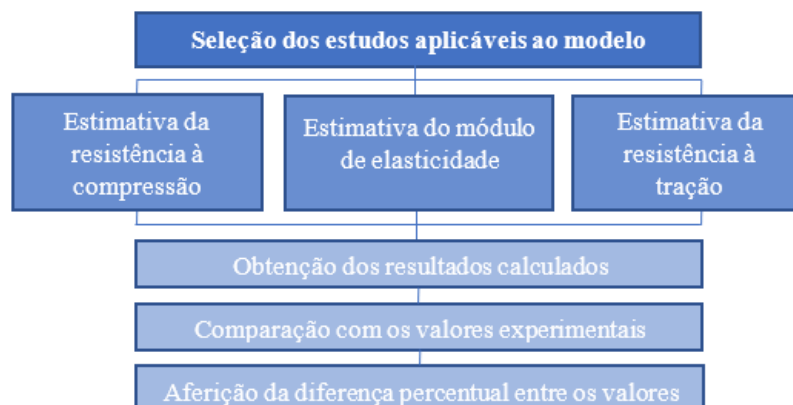


Fonte: próprio autor

Na etapa de levantamento, sem definir um período específico de publicações, foram utilizados os bancos de dados *Science Direct*, *Engineering Village* e *Web of Science*. Na string de busca foram combinadas palavras-chave no seguinte formato: “steel fiber AND concrete AND recycled aggregate concrete”. Desde a busca inicial, os seguintes parâmetros foram mantidos fixos: apenas artigos científicos publicados em periódicos internacionais (exclui-se aqui documentos publicados em conferências), publicados em língua inglesa, conter agregados reciclados na fração graúda, reforço com fibras industrializadas de aço e avaliar comportamento mecânico do CRRFA. Nesta fase foram encontrados 206 documentos sendo que, após avaliação do título e resumo, apenas 66 documentos se encaixavam nos critérios de seleção e foram selecionados. Concluída a seleção inicial, os documentos selecionados passaram por avaliação completa e nova filtragem a fim de avaliar se detalhes não contidos no resumo poderiam levar à exclusão do artigo. Nesta etapa, após criteriosa leitura, foram selecionados 52 artigos. Concluída a etapa de seleção dos documentos, os dados foram extraídos e feita a síntese dos principais achados relativos a propriedades como trabalhabilidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração e resistência à flexão do CRRFA.

Na segunda frente, após realizar um levantamento de expressões aplicáveis e definir qual modelo a ser utilizado, a investigação partiu da seleção dos documentos considerados na revisão que forneciam os dados necessários para aplicação das expressões de cálculo, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 1.5. Neste caso específico, foram selecionados todos os estudos apresentados na etapa de revisão que forneciam a resistência à compressão do concreto de referência, o volume de agregado reciclado e o volume fibras de aço na mistura. Em seguida, definido o banco de dados, o modelo foi utilizado para estimar a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade do concreto reciclado reforçado com fibras de aço.

Figura 1.5 - Metodologia para aplicação e análise do modelo de previsão de propriedades resistentes do CRRFA



Fonte: próprio autor

Uma vez aplicado o referido modelo de previsão com os dados de diversos concretos investigados em documentos que constam na revisão, a comparação destes valores estimados com os resultados experimentais fornecerão um parecer mais conciso acerca da validade e aplicabilidade do modelo.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em seis capítulos sendo que neste primeiro é apresentada uma contextualização sobre o concreto reciclado reforçado com fibras de aço. Ainda, os objetivos, a metodologia e as justificativas para a realização do trabalho são apresentadas.

Os Capítulos 2 e 3 apresentam características e conceitos fundamentais relacionados ao concreto com agregado reciclado e ao concreto reforçado com fibras, respectivamente. Estes capítulos são introdutórios e fornecem o embasamento necessário para o leitor compreender as discussões realizadas no capítulo subsequente.

No Capítulo 4 os assuntos “agregados reciclados” e “concreto reforçado com fibras” se unem e são apresentados no formato de revisão sistemática de literatura com descrição dos principais achados sobre trabalhabilidade, módulo de elasticidade e resistências à tração e à compressão do concreto reciclado reforçado com fibras de aço.

Um modelo analítico para previsão de propriedades resistentes do concreto reciclado reforçado com fibras de aço é apresentado no Capítulo 5; as expressões permitem estimar a resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração e foram utilizadas para estimar as referidas propriedades de concretos cujos resultados experimentais são conhecidos. Ao final do capítulo é apresentada análise comparativa entre valores previstos e experimentais extraídos da literatura.

Por fim, o Capítulo 6 contém as conclusões deste trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: CONCRETO RECICLADO

Neste capítulo, são abordadas as principais características do agregado reciclado bem como sua influência nas propriedades do concreto reciclado em estado fresco e endurecido.

2.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

A resistência e a durabilidade do concreto estão diretamente relacionadas à quantidade de vazios (poros) na pasta de cimento. Como os agregados naturais são extraídos de rochas com baixíssima porosidade, concretos confeccionados com estes agregados apresentam resistência e durabilidade adequados ao uso para fins estruturais. Por sua vez, no concreto com agregado reciclado, as propriedades mecânicas estão associadas não só aos vazios presentes na pasta de cimento que envolve o agregado como também à porosidade associada aos resquícios de argamassa aderida ao agregado reciclado.

O agregado reciclado de concreto (ARC) ou, simplesmente, *agregado reciclado*, é composto por fragmentos dos agregados naturais do concreto original e argamassa residual aderida à superfície destes (Figura 2.1). Essa parcela de argamassa é remanescente da britagem do concreto e sua quantidade e características estão condicionadas ao processo de produção que origina o agregado reciclado. Logo, quanto mais adequado o processo de britagem, menor a quantidade de argamassa aderida, menos poroso será o agregado reciclado e menor sua interferência no desempenho do concreto reciclado. Dessa forma, a diferença fundamental entre o concreto com agregado reciclado e o concreto com agregados naturais reside em sua porosidade (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

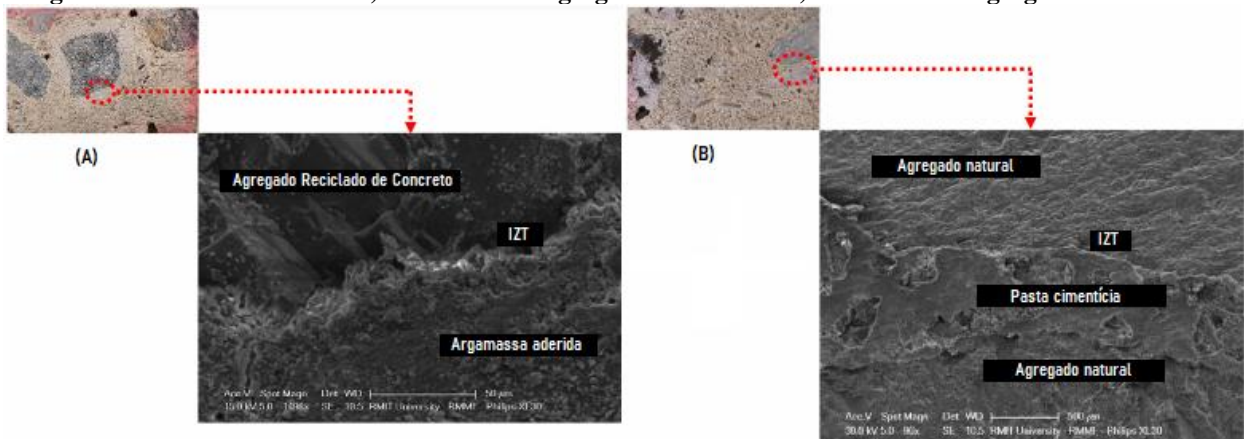
Figura 2.1 - Composição do agregado reciclado



Fonte: adaptado de Jayasuriya *et al.* (2021)

A composição do material utilizado na produção do agregado reciclado tem grande influência em sua qualidade e propriedades. Invariavelmente, o agregado reciclado possui particularidades associadas, sobretudo, à microfissuração resultante do processo de britagem que o origina. Uma das características deste agregado é a sua grande porosidade e, conseqüentemente, a maior absorção de água. A maior absorção em relação ao agregado natural é resultante da interação entre a parcela de argamassa aderida ao agregado reciclado e a nova pasta cimentícia na interface da zona de transição (IZT). Diferentemente do concreto com agregados naturais, que possui uma única zona de transição localizada entre o agregado e a pasta cimentícia, o concreto com agregado reciclado possui três interfaces (Figura 2.2). A primeira está localizada entre o agregado e a parcela de argamassa antiga nele aderida; a segunda está entre o agregado e a nova pasta cimentícia e a terceira se localiza entre a argamassa antiga e a nova pasta cimentícia.

Figura 2.2 - Microestrutura: a) concreto com agregado reciclado e b) concreto com agregados naturais



Fonte: Adaptado de Kazmi *et al.* (2018)

Devido à elevada porosidade, o agregado reciclado apresenta menor massa específica e maior capacidade de absorção de água do que o agregado natural. Segundo Khoury *et al.* (2018), a densidade do agregado reciclado pode ser considerado aspecto fundamental na heterogeneidade do material, isso pois dentro de uma mesma faixa granulométrica podem ser encontrados agregados que sejam compostos quase que exclusivamente por fragmentos do agregado natural e outros com significativa quantidade de argamassa aderida. De acordo com os estudos conduzidos por Limbachiya *et al.* (2000), o agregado reciclado possui uma densidade 7 a 10% menor que o agregado natural. Considerando que a quantidade de argamassa aderida interfere diretamente na porosidade do agregado reciclado, quantificar a porcentagem deste material aderido ao agregado (avaliando diferenças de densidade do material por exemplo) contribui para prever a qualidade do concreto reciclado (FLOREA; BROUWERS, 2013).

A importância da quantificação da porosidade do agregado reciclado por meio da estimativa de argamassa aderida reside na influência dessa característica sobre o comportamento elástico do concreto reciclado. Segundo Jayasuriya *et al.* (2018), ao variar a quantidade de argamassa aderida ao agregado de 2% para 50% a variação na resistência à compressão não superou 5%. Entretanto, o módulo de elasticidade sofreu redução de até 20% para a mesma faixa de variação, evidenciando a importância da densidade do agregado na deformabilidade do concreto. Mais do que isso, considerando o processo de ruptura do concreto reciclado e a tendência de desenvolvimentos das primeiras falhas na interface entre o agregado e a argamassa aderida, as partículas de argamassa residual do agregado reciclado são mais suscetíveis à fissuração que a nova argamassa (LIU, QIONG; XIAO; SUN, 2011).

A maior porosidade decorrente da parcela de argamassa aderida ao agregado se relaciona também com outro importante parâmetro do agregado reciclado: a capacidade de absorção de água. Há consenso na literatura que a taxa de absorção do agregado reciclado é consideravelmente superior à do agregado natural, podendo influenciar na trabalhabilidade e na relação água/cimento do concreto reciclado (ABBAS *et al.*, 2009; AGHILILOTF; PALASSI; RAMEZANIANPOUR, 2021; BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; BELTRÁN *et al.*, 2014; BUTLER; WEST; TIGHE, 2011; CORINALDESI, 2010; CORINALDESI; MORICONI, 2009; CRUZ, 2018; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; GERIN, 2020; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; GÜNEYISI *et al.*, 2016; HANIF *et al.*, 2017; KAPOOR; SINGH; SINGH, 2016; KHOURY; CAZACLIU; REMOND, 2017; LIMBACHIYA; LEELAWAT; DHIR, 2000; LIU, QIONG; XIAO; SUN, 2011; MOHAMMED; NAJIM, 2020; PACHECO *et al.*, 2019; PARK; SEO; LEE, 2005; PICKEL, 2014; RAHAL, 2007; ROESLER *et al.*, 2013;

SALGADO; SILVA, 2021; THOMAS, JOB; THAICKAVIL; WILSON, 2018; VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; XIAO; LI; ZHANG, 2005; ZAHARIEVA *et al.*, 2003; ZHAO *et al.*, 2013). Na Tabela 2.1 são apresentadas taxas de absorção de água dos agregados, reportadas na literatura; para o agregado natural o intervalo de valores vai de 0,20% a 3,00% enquanto no agregado reciclado a variação é de 1,97% a 9,25%.

Tabela 2.1 – Absorção de água em agregados graúdos reciclados e naturais disponíveis na literatura

Documento	Teor de absorção do agregado reciclado	Teor de absorção do agregado natural
Bairagi <i>et al.</i> (1993)	3,95%	0,99%
Limbachiya <i>et al.</i> (2000)	4,90-5,20%	2,50%
Gómez-Soberón (2002)	5,83-8,16%	0,88-1,49%
Zaharieva <i>et al.</i> (2003)	6,00%	0,20%
Vieira e Dal Molin (2004)	6,04%	2,50%
Park <i>et al.</i> (2005)	4,10%	1,20%
Xiao <i>et al.</i> (2005)	9,25%	0,40%
Etxeberria <i>et al.</i> (2007)	4,44%	0,88%
Rahal (2007)	3,47%	0,68%
Abbas <i>et al.</i> (2009)	3,30-5,40%	0,34-0,89%
Corinaldesi e Moriconi (2009)	8,00%	2,00%
Corinaldesi (2010)	6,80%	3,00%
Butler <i>et al.</i> (2011)	3,98-5,72%	1,54%
Liu <i>et al.</i> (2011)	6,90%	0,40%
Roesler <i>et al.</i> (2013)	5,51%	1,90-2,73%
Zhao <i>et al.</i> (2013)	4,10%	0,70%
Beltrán <i>et al.</i> (2014)	6,94%	1,53%
Pickel (2014)	4,72%	1,53%
Güneyisi <i>et al.</i> (2016)	7,00%	0,45%
Kapoor <i>et al.</i> (2016)	5,35%	0,68%
Hanif <i>et al.</i> (2017)	1,97%	0,94%
Khoury <i>et al.</i> (2017)	4,90%	-
Pedro <i>et al.</i> (2017)	3,90%	1,30%
Thomas <i>et al.</i> (2018)	6,40%	0,70%
Pacheco <i>et al.</i> (2019)	4,20%	1,10%
Gerin (2020)	5,70%	1,60%
Mohammed e Najim (2020)	2,01%	0,68%
Aghililotf <i>et al.</i> (2021)	7,45-8,70%	0,49-2,40%
Salgado e Silva (2021)	6,40%	1,20%

Em razão da maior porosidade e conseqüente capacidade de absorção de água do agregado reciclado, para evitar que parte da água de hidratação da pasta de cimento seja

absorvida pelo agregado e tanto a relação a/c quanto a trabalhabilidade do concreto reciclado sejam reduzidas, alguns autores recomendam a pré-saturação do agregado entre 80-90% de sua taxa absorção (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; LEITE, 2001).

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO EM ESTADO FRESCO

Um dos principais parâmetros investigados nas pesquisas relacionadas à substituição do agregado natural pelo reciclado é o teor de substituição e suas implicações no desempenho do concreto, não só nas propriedades mecânicas do concreto endurecido, mas também em sua trabalhabilidade (estado fresco). Neste sentido, a Tabela 2.2 apresenta uma série de documentos com diversos teores de substituição investigados e os principais aspectos avaliados por cada estudo.

Tabela 2.2 - Estudos sobre a substituição do agregado natural por agregado reciclado

Documento	País	Teores de substituição por agregado reciclado	Principais pontos avaliados do concreto
Bairagi <i>et al.</i> (1993)	IND	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Limbachiya <i>et al.</i> (2000)	ESC	0, 30%, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Leite (2001)	BRA	0, 11,5%, 50%, 88,5% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Vazquez e Gonçalvez (2005)	ESP	20%	Qualidade do agregado reciclado de concreto
Xiao e Falkner (2007)	CHN	0, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Etxeberrria <i>et al.</i> (2007)	ESP	0, 25%, 50% e 100%	Método de mistura do concreto e propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido
Rahal (2007)	KUW	0 e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Corinaldesi (2010)	ITA	0 e 30%	Propriedades mecânicas no estado endurecido
Butler <i>et al.</i> (2011)	CAN	0 e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Breccolotti e Materazzi (2013)	ITA	0, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Kim e Yun (2013)	KOR	0, 30%, 60% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Prince e Singh (2013)	IND	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Aderência aço-concreto
Prince e Singh (2014)	IND	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Aderência aço-concreto
Guerra <i>et al.</i> (2014)	POR	0, 20%, 30%, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Seara-Paz <i>et al.</i> (2014)	ESP	0, 20%, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido

Tabela 2.2 - Estudos sobre a substituição do agregado natural por agregado reciclado (continuação)

Documento	País	Teores de substituição por agregado reciclado	Principais pontos avaliados do concreto
Shang <i>et al.</i> (2015)	CHN	30%	Efeitos de ciclos de gelo e degelo na aderência aço-concreto
Prince e Singh (2015)	IND	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Pour (2016)	CAN	0, 30%, 40% e 50%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Gourav e Singh (2017)	IND	0, 50% e 100%	Aderência aço-concreto e comprimento de ancoragem
Wardeh <i>et al.</i> (2017)	FRA	0, 30% e 100%	Aderência aço-concreto
Pedro <i>et al.</i> (2017)	POR	0, 50% e 100%	Durabilidade
Rafi (2018)	PAK	0, 10%, 20% e 30%	Aderência aço-concreto e comprimento de ancoragem
Arezoumandi <i>et al.</i> (2018)	IRI	0, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Lv <i>et al.</i> (2018)	CHN	0, 30%, 50%, 70% e 100%	Aderência aço-concreto e comprimento de ancoragem
Thomas <i>et al.</i> (2018)	IND	0, 25%, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido
Verian <i>et al.</i> (2018)	EUA	0 - 100%*	Revisão de literatura com diversas taxas de ARC
Zheng <i>et al.</i> (2018)	CHN	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Propriedades mecânicas do concreto com ARC e agregado reciclado de tijolos de barro
Ghorbel <i>et al.</i> (2019)	FRA	0, 30% e 100%	Comportamento do concreto e energia de fratura
Pacheco <i>et al.</i> (2019)	POR	0, 25%, 50% e 100%	Propriedades mecânicas no estado endurecido
Bai <i>et al.</i> (2020)	CHN	0 - 100%*	Revisão literária sobre trabalhos com diferentes taxas de ARC
Gerin (2020)	BRA	0, 30%, 50% e 100%	Influência no efeito de confinamento de pilares preenchidos
Mohammed e Najim (2020)	IRQ	25%, 50%, 75% e 100%	Propriedades mecânicas no estado endurecido
Jayasuriya <i>et al.</i> (2021)	EUA	0 - 100%*	Revisão literária sobre trabalhos com diferentes taxas de ARC

*Estudos de revisão que contemplam diversas taxas de substituição do agregado natural

Considerando o concreto reciclado no estado fresco, sua resposta natural à substituição do agregado natural pelo reciclado é a perda de trabalhabilidade. Isso se deve à natureza porosa do agregado reciclado que tende a utilizar parte da água de amassamento do concreto para saturar seus poros. De acordo com Bairagi *et al.* (1993), essa migração de água para o interior do agregado é mais acelerada na fase inicial de mistura do concreto, indicando que do ponto de vista prático, a trabalhabilidade do concreto com a substituição do agregado é

proeminentemente afetada nos primeiros 10 minutos. Com isso, conforme apresenta a Tabela 2.3, a perda de fluidez é comum e, conseqüentemente, a redução da trabalhabilidade (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; GERIN, 2020; LEITE, 2001; LV *et al.*, 2018; MONTGOMERY, 1998; PACHECO *et al.*, 2019; POON *et al.*, 2004; SU, 2020).

Tabela 2.3 - Variação da trabalhabilidade do concreto frente ao aumento no teor de agregado reciclado

Autores	Fator a/c	Teores de substituição por ARC (%)	Pré-saturação do ARC	Trabalhabilidade (mm)
Bairagi et al. (1993)	0,57	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Não	35-20
	0,50			30-20
	0,43			30-15
Montgomery (1998)	0,35	0 e 100%	Não	35-5
Guerra <i>et al.</i> (2014)	0,53	0, 20%, 50% e 100%	Não	120-130
Prince e Singh (2015)	0,54	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Sim	70-52
Arezoumandi <i>et al.</i> (2018)	0,40	0, 50% e 100%	Não	180-140
Lv <i>et al.</i> (2018)	0,46	0, 30%, 50%, 70% e 100%	Não	48-23
Rafi (2018)	0,44	0, 10%, 20% e 30%	Não	45-40
Pacheco <i>et al.</i> (2019)	0,54	0, 25%, 50% e 100%	Não	128-117
Su (2020)	0,35	0, 40%, 70% e 100%	Não	80-23
Ali <i>et al.</i> (2021)	0,35	0 e 100%	Sim	90-110

A alternativa mais recomendada na literatura para evitar que ocorra a movimentação da massa de água consumida no processo de hidratação da pasta cimentícia é a pré-saturação do agregado reciclado. Este método foi adotado por Ali *et al.* (2021) para uma mistura com 100% de agregado reciclado, e conferiu abatimento 20% superior ao concreto confeccionado somente com agregados naturais. Outra possibilidade é a compensação do volume total de água adicionado à mistura, técnica adotada por Guerra *et al.* (2014) e que resultou em aumento da trabalhabilidade do concreto mesmo com a substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados.

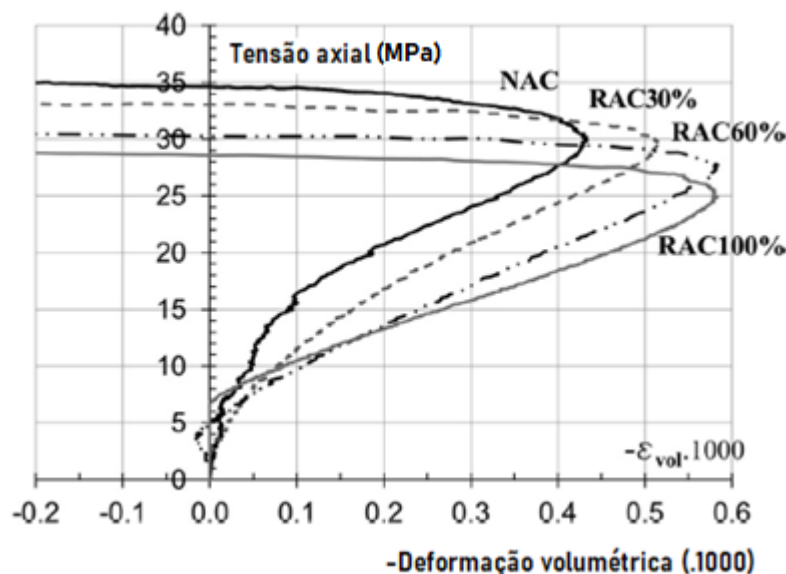
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO EM ESTADO ENDURECIDO

Documentos que abordam a caracterização de concretos reciclados no estado endurecido apontam para dois fatores preponderantes nas propriedades mecânicas:

características do concreto utilizado na produção do agregado reciclado e taxa de substituição do agregado natural.

Dentro outros fatores, o teor de substituição afeta a resposta à compressão uniaxial do concreto. Folino e Xargay (2014) investigaram o comportamento do concreto reciclado submetido à compressão uniaxial com diferentes taxas de substituição do agregado natural (0, 30, 60 e 100%). A presença do agregado reciclado aumenta a degradação do concreto à compressão axial fazendo com que a resposta da deformação volumétrica com o aumento do teor de substituição do agregado natural se assemelhe ao que ocorre em concretos com diferentes classes de resistência. Para uma mesma taxa de aplicação de carregamento, assim como ocorre nos concretos menos resistentes, concretos com maiores quantidades de agregado reciclado apresentam maior redução volumétrica (Figura 2.3). Nesta perspectiva, Wang *et al.* (2013) verificaram que concretos reciclados com substituição total do agregado natural e diferentes classes de resistência (C45, C50, C55, C60 e C70) apresentaram deformação axial de compressão entre 4,8% e 9,3% maiores do que o concretos apenas com agregado natural com a mesma classe de resistência. Essas respostas corroboram os achados de Xiao *et al.* (2005): a resistência última diminui com o aumento do teor de substituição do agregado ao passo que a deformação correspondente aumenta com o incremento de agregado reciclado. Isso significa que submetido a um mesmo carregamento e condições de deformação, o concreto reciclado possui maior capacidade de absorver energia (tenacidade) que o concreto com agregados naturais.

Figura 2.3 - Tensão axial vs. deformação volumétrica do concreto convencional (NAC) e reciclado (RAC) com diferentes taxas de agregado reciclado



Fonte: Adaptado de Folino e Xargay (2014)

De maneira geral, em relação às propriedades mecânicas do concreto reciclado, observa-se redução na resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição do agregado. Na Tabela 2.4 são apresentados diversos documentos que avaliaram, experimentalmente, estes parâmetros.

Tabela 2.4 - Estudos concentrados nas propriedades mecânicas do concreto reciclado

Documento	Fator a/c	Teores de substituição por agregado reciclado	Pré-saturação	f _c (MPa) mín-máx	E (GPa) mín-máx	f _{ct} (MPa) mín-máx
Bairagi <i>et al.</i> (1993)	0,57	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Não	25,1 - 21,0	28,9 - 20,3	2,6 - 1,5
	0,50			29,7 - 25,7	31,5 - 22,5	3,1 - 2,0
	0,43			35,0 - 31,0	35,0 - 24,7	4,3 - 2,4
Limbachiya <i>et al.</i> (2000)	0,29	0, 30%, 50% e 100%	Não	79,0 - 72,0	30,0 - 30,5	7,0 - 7,2
Rahal (2007)	0,65	0 e 100%	Sim	23,6 - 22,1	11,4 - 12,4	-
	0,50			26,7 - 25,1	14,9 - 11,3	
	0,48			28,9 - 27,2	15,7 - 14,9	
	0,43			31,1 - 28,7	17,8 - 14,7	
	0,40			33,7 - 39,5	17,1 - 13,4	
Tabsh e Abdelfatah (2009)	0,58	0 e 100%	Não	25,7 - 23,8	-	4,0 - 2,8
	0,37			52,1 - 45,8		4,7 - 4,1
Corinaldesi (2010)	0,40	0 e 30%	Sim	58,6 - 46,1	37,3 - 32,7	-
	0,45			56,1 - 45,8	36,9 - 33,3	
	0,50			51,2 - 39,9	35,6 - 27,7	
	0,55			47,1 - 36,3	24*	
	0,60			43,9 - 24,7	33,9 - 22,9	
Butler e West (2011)	0,60	0 e 100%	Sim	34,4 - 36,9	-	2,9 - 3,6
	0,38			54,7 - 54,0		2,25 - 3,0
Prince e Singh (2013)	0,54	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Sim	36,9 - 24,7	-	-
Breccolotti e Materazzi (2013)	0,50	0, 50% e 100%	Não	55,8 - 36,5	-	3,6 - 2,5
	0,45			53,1 - 45,1		4,8 - 4,1
Seara-Paz <i>et al.</i> (2014)	0,50	0, 20%, 50% e 100%	Sim	53,5 - 35,2	-	-
	0,65			44,5 - 35,6		
Guerra <i>et al.</i> (2014)	0,53	0, 20%, 50% e 100%	Não	48,5 - 43,4	-	-
Thomas <i>et al.</i> (2018)	0,40	0, 25%, 50% e 100%	Sim	52,8 - 42,8	38,5 - 24,6	5,7 - 4,6
	0,45			47,4 - 40,2	37,8 - 23,8	4,9 - 4,5
	0,50			41,5 - 34,6	36,1 - 24,9	4,3 - 3,6
Zheng <i>et al.</i> (2018)	0,35	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Não	51,2 - 47,6	-	-
	0,55			25,0 - 23,8		
Pacheco <i>et al.</i> (2019)	0,54	0, 25%, 50% e 100%	Não	51,4 - 46,7	47,4 - 37,5	3,1 - 2,9

Tabela 2.4 - Estudos concentrados nas propriedades mecânicas do concreto reciclado (continuação)

Documento	Fator a/c	Teores de substituição por agregado reciclado	Pré-saturação	f _c (MPa) mín-máx	E (GPa) mín-máx	f _{ct} (MPa) mín-máx
Gerin (2020)	0,68	0, 30%, 50% e 100%	Não	36,2 - 40,7	31,3 - 28,5	3,2 - 3,5
Mohammed e Najim (2020)	0,45	25%, 50%, 75% e 100%	Não	52,1 - 40,2	30,1 - 27,2	5,2 - 3,9

* Apenas um resultado foi fornecido pela autora

Conforme apresentado, a resposta mais comum à substituição do agregado natural pelo reciclado é a redução da resistência à compressão do concreto. Com 100% de substituição a redução na resistência indicado por Bairagi *et al.* (1993) chegou a 40%. Do mesmo modo, Etxeberria *et al.* (2007) ao avaliarem a influência da substituição do agregado natural por agregado reciclado em taxas de substituição entre 25% e 100%, constataram que concretos com substituição total do agregado gráudo apresentaram resistência à compressão até 25% inferior ao concreto convencional, mantendo a relação a/c (0,50) e quantidade de cimento (325 kg/m³). Também, Rahal (2007) investigou concretos reciclados com resistências entre 20 e 50 MPa sendo que 5 destes foram produzidos usando agregado gráudo natural e outros 5 com agregado de resíduo de concreto (100%). Em média, os espécimes cúbicos de concreto reciclado apresentaram 88,4% da resistência obtida para o concreto convencional. Analogamente, os corpos de prova cilíndricos apresentaram, respectivamente, 92,2% do concreto com agregado natural. Em suma, os resultados obtidos pelo autor indicaram que aos 28 dias os corpos de prova cúbicos e cilíndricos submetidos ao ensaio de compressão e cisalhamento indireto apresentaram, em média, 90% da resistência conferida pelos concretos produzidos com agregado natural.

Resultados similares foram observados por Tabsh e Abdelfatah (2009), onde ensaios de caracterização indicaram uma pequena queda da resistência à compressão com a incorporação do agregado reciclado. Entretanto, ratificando a importância que a resistência do material utilizado na produção do agregado reciclado possui na resistência do novo concreto, os resultados indicaram que o concreto confeccionado com agregados reciclados derivados de um concreto C50 atingiram praticamente a mesma resistência do concreto com agregados naturais, enquanto o concreto com agregado reciclado oriundo de um concreto C30 apresentou resistência à compressão cerca de 30% inferior ao concreto convencional.

A redução na resistência à compressão do concreto reciclado com o aumento na taxa de substituição do agregado natural também foi verificada por Seara-Paz *et al.* (2014).

Considerando diferentes classes de resistência (relação a/c 0,50 e 0,65) frente a taxas de substituição de até 100% dos agregados, os resultados obtidos indicaram redução na resistência de até 31% quando os concretos foram confeccionados somente com agregado reciclado. Este comportamento também foi relatado por Prince e Singh (2013) e Prince e Singh (2015).

Segundo a literatura, teores de substituição acima de 30% reduzem a resistência à compressão axial do concreto (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; BELTRÁN *et al.*, 2014; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; FOLINO; XARGAY, 2014; GHONEIM *et al.*, 2020; GUERRA *et al.*, 2014; JOHN ROBERT PRINCE; SINGH, 2013; LIMBACHIYA; LEELAWAT; DHIR, 2000; PRINCE; SINGH, 2015; SEARA-PAZ *et al.*, 2014; THOMAS, JOB; THAICKAVIL; WILSON, 2018; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; WANG, WEI LUN; KOU; XING, 2013; XIAO; LI; ZHANG, 2005; ZHANG; PEI, 2017). Essa resposta é atribuída à maior porosidade do concreto reciclado; nestes casos, pode ser necessário o aumento no consumo de cimento para que o concreto reciclado mantenha a mesma classe de resistência do concreto com agregados naturais (BELTRÁN *et al.*, 2014; BUTLER; WEST; TIGHE, 2011; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; XIAO; LI; ZHANG, 2005). Entretanto, a literatura indica que para concretos com teores de substituição entre 20 e 30% a resistência à compressão não difere significativamente do concreto produzido exclusivamente com agregados naturais, sendo dispensada a necessidade de aumentar a quantidade de cimento na mistura (BELTRÁN *et al.*, 2014; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; THOMAS, C. *et al.*, 2013; THOMAS, JOB; THAICKAVIL; WILSON, 2018; XIAO *et al.*, 2012).

Diferentemente da maioria dos documentos consultados, alguns estudos reportaram comportamento similar ou até aumento da resistência à compressão do concreto com o aumento da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado (BUTLER; WEST; TIGHE, 2011; HANIF *et al.*, 2017; BAI *et al.*, 2020; GERIN, 2020). Butler e West (2011) ao investigarem propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado natural e 100% de substituição por agregado reciclado em traços com classe de resistência alvo de 30 e 50MPa, reportaram um aumento na resistência à compressão do concreto reciclados para a classe de 30MPa (a classe de 50MPa apresentou resistência praticamente idêntica), sendo esta atribuída a uma forte ligação entre o agregado reciclado e argamassa. Resposta semelhante foi relatada por Hanif *et al.* (2017) que, com o intuito de avaliar o emprego do agregado reciclado em concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial, conduziram ensaios com concretos de diferentes classes de resistência (C20, C25, C30, C40 e C50) com 100% de substituição do agregado natural pelo ARC, reportando que a referida substituição não apresentou

interferências significativas no desempenho resistente do concreto. Segundo Bai *et al.* (2020), é possível que a resistência na interface da zona de transição entre a argamassa aderida ao agregado e a nova matriz cimentícia tenha aumentado e isso se refletiu na maior resistência à compressão do compósito. Ainda neste sentido, Gerin (2020), ao não realizar a pré-saturação do agregado reciclado de concreto, apresentou resultados para a resistência à compressão do concreto indicando aumento da mesma com o incremento na taxa de substituição.

No concreto, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estão intrinsecamente associados à sensibilidade destes parâmetros à porosidade dos seus constituintes. Assim, tal qual ocorre para a resistência à compressão, a presença do agregado reciclado gera implicações no módulo de elasticidade do concreto. Especificamente, o módulo de elasticidade é influenciado não só pela matriz cimentícia, mas também pela fase agregado e, principalmente, pela zona de transição na interface entre estes materiais. Desta forma, concretos produzidos com substituição, parcial ou total, do agregado natural pelo agregado reciclado estão sujeitos a variações no comportamento elástico do compósito.

Na Itália, ainda que já conte com diretriz normativa para uso do concreto com agregado reciclado (NTC-2008), a norma não abrange os efeitos da substituição no módulo elástico do concreto. Neste sentido, Corinaldesi (2010) avaliou o comportamento mecânico e elástico de concretos reciclados a partir de um estudo experimental com traços de concreto produzidos com substituição parcial dos agregados naturais frente a diferentes dosagens adotadas para relação a/c. Os resultados indicaram que o módulo de elasticidade do concreto reciclado é 15% menor do que o conferido pelo concreto com agregados naturais. Silva *et al.* (2016) produziram uma revisão na literatura englobando 121 trabalhos publicados em um período de 43 anos, de 1973 a 2015, relacionados ao efeito da incorporação de agregado reciclado no módulo de elasticidade do concreto. A partir da síntese destes documentos, concluiu-se que o uso de até 30% de agregado reciclado não interfere significativamente no comportamento elástico do concreto (LIMBACHIYA; LEELAWAT; DHIR, 2000; TABSH; ABDELFAH, 2009; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2016). Entretanto, quando empregado 100% de agregado reciclado, o módulo de elasticidade apresentou redução de até 40%.

Em suma, assim como observado para a resistência à compressão, o módulo de elasticidade decai com o aumento no teor de agregado reciclado. Entretanto, o grau de interferência depende de fatores como tamanho e qualidade do concreto original, dentre outros.

As observações feitas para a resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto reciclado se repetem para a resistência à tração. A qualidade do agregado reciclado

novamente se mostra importante. Tabsh e Abdelfatah (2009) encontraram redução de até 30% na resistência à tração do concreto confeccionado com agregado reciclado derivado de um concreto de 30MPa, enquanto o concreto com agregados oriundos de uma matriz com 50MPa atingiram praticamente a mesma resistência do concreto convencional. Em relação à taxa de substituição, os documentos considerados indicam que o aumento na porção de agregado reciclado leva à redução da resistência à tração, tal qual ocorreu para outras propriedades do concreto reciclado (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; BRECCOLOTTI; MATERAZZI, 2013; MOHAMMED; NAJIM, 2020; PACHECO *et al.*, 2019; TABSH; ABDELATAH, 2009; THOMAS, JOB; THAICKAVIL; WILSON, 2018).

2.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Mediante o exposto, observa-se que o concreto reciclado é diretamente influenciado pela qualidade e quantidade de agregado reciclado. Os efeitos estão associados à maior porosidade e capacidade de absorção de água do agregado reciclado, além da taxa de substituição do agregado natural por agregado reciclado. Os resquícios de argamassa aderidos ao agregado reciclado após o processo de produção aumentam, consideravelmente, a porosidade do agregado, diminuindo sua densidade e gerando uma série de implicações na rigidez do concreto reciclado. Com isso, resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração do concreto reciclado tendem a ser menores quando comparados ao concreto convencional. Essas implicações se acentuam com o aumento no teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.

Dessa forma, para o uso dos agregados reciclados é importante que se pondere outros fatores, como a redução na extração de recursos naturais não renováveis e, principalmente, os efeitos positivos associados ao ciclo de reutilização de parte dos resíduos gerados na construção civil na própria indústria deste segmento. Em razão disso, diversos países contam com diretrizes normativas que regulam a produção de concreto reciclado.

A norma indiana IS:383 (2016) permite o uso de até 20% de agregado reciclado em construções de concreto armado com classe de resistência de até 25 MPa. Na Itália, a produção de concreto com 30% de agregado reciclado é regulamentada pelo *Italian Building Code* na NTC (2008), em vigor desde 2009. Em função do elevado custo associado à importação de agregado gráudo natural de outros países na região do golfo pérsico, após o impacto ambiental associado à produção de agregados para a construção civil levar as autoridades do Kuwait proibirem a produção local deste material, o emprego do agregado de resíduos de concreto

ganhou força e importância nas pesquisas relacionadas a construção civil no país (RAHAL, 2007).

O Brasil conta com as normas ABNT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2021) que regulamentam o emprego do agregado reciclado em obras de pavimentação viária e produção de argamassa e concreto de cimento Portland com até 20% de agregado reciclado.

Muitos dos estudos citados neste capítulo investigaram concretos com classes de resistência superiores a 30 MPa, tendo apresentado resultados satisfatórios e que indicam a viabilidade da utilização do concreto reciclado para fins estruturais. Em síntese, de acordo com os documentos analisados, misturas produzidas com volumes de agregados reciclados que não ultrapassem a 30% do total não apresentam considerável variação nas propriedades resistentes do concreto, dispensando a necessidade de aumentar o consumo de cimento para que o concreto reciclado atinja a mesma resistência do concreto convencional. A redução no módulo de elasticidade do material é preponderante com o aumento na substituição do agregado natural, sendo mais significativo para substituições superiores à 50%.

CAPÍTULO 3: CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

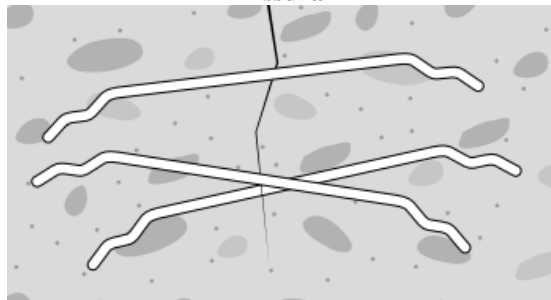
Neste capítulo são abordadas as características do concreto reforçado com fibras de aço (CRF). Considerações sobre os principais aspectos que caracterizam os diferentes tipos de fibras de aço (tipo utilizado nos estudos considerados neste documento) são apresentados. São discutidos os mecanismos mobilizados pelas fibras ao atuarem como reforço da matriz cimentícia bem como os efeitos que a sua incorporação proporciona ao concreto tanto em estado fresco quanto endurecido.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O excelente desempenho mecânico sob compressão, a moldabilidade e a durabilidade são características associadas ao concreto. Entretanto, o comportamento frágil, a baixa capacidade de deformação e a baixa resistência à tração são limitações importantes e que podem ser contornadas com a incorporação de fibras.

O concreto reforçado com fibras (CRF) é multifásico e pode ser esquematicamente dividido em duas fases principais: matriz e reforço. A matriz corresponde à fase contínua e aglutinadora que, dentre outras finalidades, envolve o reforço. O reforço, caracterizado pela fase dispersa, é responsável por melhorar propriedades da matriz (SMITH; HASHEMI, 2012). No caso do concreto reforçado com fibras, o concreto atua como matriz e as fibras incorporadas representam a fase dispersa (reforço). A incorporação de fibras cria pontes de transferência de tensões ao longo das fissuras; as fibras “costuram” a falha e aumentam tanto a ductilidade quanto a resistência pós-fissuração do concreto (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Representação da ponte de transferência de tensões promovida pela presença da fibra na fissura



Fonte: Catálogo Bekaert

Assim, a adição de fibras discretas ao concreto pode ter como objetivo controlar a fissuração; da incorporação surgem no compósito efeitos como o aumento da tenacidade e a melhoria do desempenho à fadiga e ao impacto. Se suficientemente resistentes e aderidas à matriz cimentícia, as fibras podem aumentar a resistência do compósito em pontos fissurados após a fissuração do concreto (VAN CHANH, 2004).

O tipo de fibra, seu comprimento, volume de incorporação e a aderência com a matriz cimentícia têm considerável influência na resposta do concreto reforçado com fibras. Quanto ao material, as fibras de aço são as mais utilizadas para aplicações estruturais. De acordo com a ABNT NBR 15530 (2019), o uso das fibras de aço-carbono regulares como material de reforço para o concreto é adequado pois o aço possui módulo de elasticidade ao mínimo cinco vezes maior que o do concreto e demanda temperaturas acima de 370° C para que se deformem com o calor. Em relação à forma, as fibras podem apresentar conformações diversas (Figura 3.2) como: lisa, com ancoragem em gancho e corrugadas.

Figura 3.2 - Fibras de aço com ancoragem em gancho



Fonte: Catálogo Bekaert

Geometricamente, as fibras de aço são caracterizadas pelo comprimento (l) e diâmetro equivalente (d) (Figura 3.3). A partir da razão entre o comprimento e o diâmetro (l/d), obtém-se a esbeltez ou razão de aspecto das fibras. Geralmente, a razão de aspecto das fibras para reforço do concreto varia entre 50 e 150 e, quanto maior a razão, maior a probabilidade de distribuição heterogênea das fibras na mistura do concreto (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 3.3 - Geometria da fibra de aço



Fonte: Catálogo Bekaert

A ABNT NBR 15530 (2019) é a referência nacional para as especificações e requisitos do uso de fibras de aço no concreto. Nessa norma são apresentadas as tipologias e classes para caracterização das fibras, conforme ilustra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação das fibras de aço para concreto

Tipo	Grupo	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15530 (2019)

De acordo com a ABNT NBR 15530 (2019), as fibras de aço podem ser classificadas quanto ao tipo e quanto à seção transversal. Quanto ao tipo, tem-se:

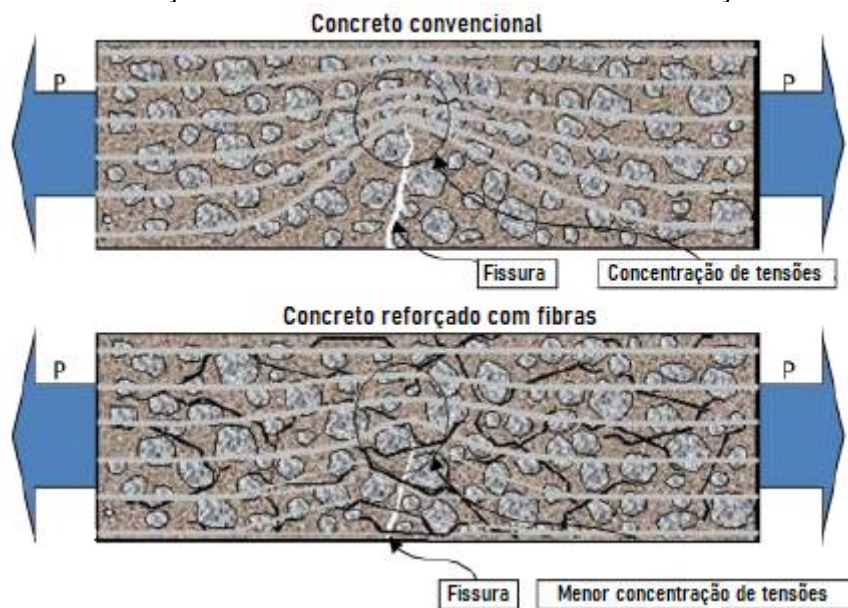
- Tipo A: fibra com ancoragens nas extremidades;
- Tipo C: fibra corrugada;
- Tipo R: fibra reta.

A classificação segundo a conformação geométrica se restringe ao perfil longitudinal das fibras. Por sua vez, a seção transversal é condicionada ao tipo de aço utilizado na fabricação da fibra e, neste caso, há três grupos distintos:

- Grupo I: fibra oriunda de arame trefilado a frio;
- Grupo II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio;
- Grupo III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

Por fim, é importante entender o mecanismo de ruptura do concreto. Ao contrário da ruptura por compressão, que se manifesta em decorrência do surgimento de numerosas fissuras, a ruptura por tração se dá pela união de algumas fissuras que se interligaram com o processo de propagação da fissuração interna no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Uma pequena falha representada pelo surgimento de fissuras na matriz reduz a área disponível para absorção das tensões fazendo com que estas se acumulem nas extremidades das fissuras; a concentração de tensões acelera a propagação da fissura e compromete o comportamento do concreto (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Concentração de tensões em concretos convencional e reforçado com fibras de aço



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011)

É devido a este mecanismo de ruptura que a resistência do concreto à tração é tão mais afetada pela fissuração que a resistência à compressão; é nessa fragilidade do concreto tracionado que o reforço com fibras se insere. Conforme ilustra a Figura 3.4, o desvio nas linhas de tensão, provocado pela fissura, ocasiona a concentração de tensões na extremidade da falha. No concreto simples, quando a tensão ali concentrada superar a resistência à tração do material,

ocorrerá a ruptura abrupta do material. Por sua vez, no concreto com adição de fibras, em razão da costura exercida pelas fibras, há uma redistribuição de tensões no local e, conseqüentemente, a concentração observada nas extremidades da falha no concreto convencional é drasticamente minimizada no concreto reforçado com fibras, aumentando a capacidade de absorver energia e a resistência pós fissuração.

3.2 COMPORTAMENTO DO CRFA

O comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é função da quantidade de fibras, das características geométricas e propriedades mecânicas destas fibras bem como da interação entre matriz e fibra. Por essa razão, é comum que os documentos que tratam do CRFA utilizem vários teores de fibras com distintas razões de aspecto na definição da combinação que resulta no melhor desempenho do concreto (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Teores de incorporação e razão de aspecto das fibras de aço utilizadas como reforço no concreto

Documento	Teor de fibras (%)	Razão de aspecto (λ)
Song e Hwang (2004)	0,50; 1,00; 1,50 e 2,00	64
Yazici <i>et al.</i> (2007)	0,50; 1,00 e 1,50	45; 65 e 80
Mohod (2012)	0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50 e 2,00	75
Santana (2014)	1,00 e 1,50	17,33 e 33,33
Abbass <i>et al.</i> (2018)	0,50; 1,00 e 1,50	65 e 80
Li e Li (2019)	1,00 e 2,00	48
Samarakoon <i>et al.</i> (2019)	0,50 e 1,00	63,5
Ghoneim <i>et al.</i> (2020)	0,00 e 0,75	64 e 67
Tan <i>et al.</i> (2020)	0,50; 1,00; 1,50 e 2,00	44
Razzaghi <i>et al.</i> (2021)	1,5	37,5
Zong <i>et al.</i> (2021)	0,60; 1,20 e 1,80	57,6

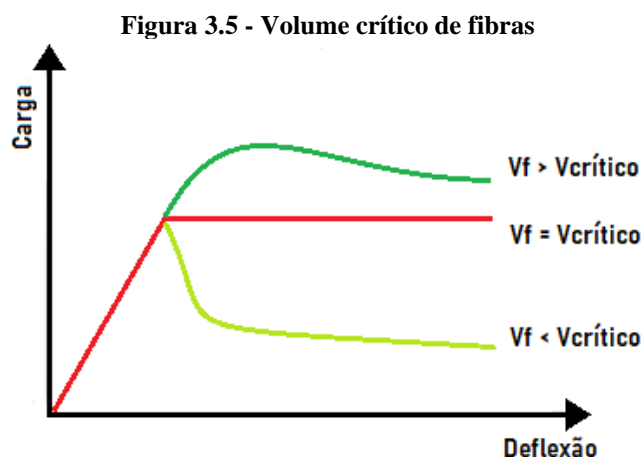
Via de regra, a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras são os principais parâmetros a considerar na escolha do tipo mais adequado de fibra para reforçar o concreto. Fibras que apresentam módulo de elasticidade inferior ao do concreto (acrílico, algodão, poliméricas, etc.) conferem uma capacidade reduzida de reforço ao concreto, limitando-se a controlar a microfissuração por retração na fase inicial de hidratação do cimento. Por sua vez, fibras com elevado módulo de elasticidade (amianto, vidro, lã de rocha e, principalmente, aço) atuam efetivamente como reforço estrutural, podendo reduzir o consumo de armadura em determinados elementos; isso ocorre, por exemplo, em blocos de fundação,

que podem ter sua armadura de pele suprimida com a incorporação, em dosagem adequada, de fibras de aço ao concreto.

Com relação às características geométricas das fibras destacam-se a presença de ganchos (ancoragem), a conformação superficial, a orientação na matriz e o volume de fibras (V_f). De acordo com Zollo (1997), a conformação superficial das fibras influencia na quantidade de energia que pode ser absorvida na região fissurada. Por sua vez, a quantidade de energia absorvida depende da dificuldade que determinado tipo de conformação pode oferecer ao esforço de arrancamento quando o processo de fissuração se iniciar. Considerando as irregularidades na superfície das fibras corrugadas ou as dobras das fibras com gancho e levando em conta apenas a conformação superficial, estes tipos de fibras apresentarão maior resistência ao arrancamento da matriz cimentícia do que uma fibra lisa.

O volume de fibras incorporado à mistura afeta diretamente a trabalhabilidade do concreto. O volume adequado de incorporação está associado a diversos fatores relacionados à fibra e à matriz cimentícia. Para que a fibra possa atuar costurando a fissura, deve estar orientada diagonal ou ortogonalmente à direção da falha, permitindo que suas extremidades se ancorem em faces opostas da fissura. A probabilidade de que as fibras interceptem as fissuras na orientação mais adequada está diretamente associada ao teor de incorporação, grandeza correspondente à quantidade de fibras por unidade de volume (V_f).

Além disso, a concentração de fibras por volume de concreto pode ser utilizada para classificação do concreto reforçado com fibras. O volume de fibras é considerado alto quando são incorporadas em taxas que variam entre 3 e 12%; moderada entre 1 e 3% e baixa entre 0,1 e 1,0% por volume de concreto (ZOLLO, 1997). Esta classificação é importante porque o volume de fibras afeta significativamente a trabalhabilidade, cura e desempenho do concreto endurecido. Ainda, a importância do teor de fibras incorporado à matriz pode ser associada à capacidade do concreto reforçado apresentar maior ou menor resistência após o início da fissuração. Assim, o conceito de volume crítico ($V_{\text{crítico}}$) representa a dosagem para a qual o compósito mantém a capacidade resistente a partir da ruptura da matriz (Figura 3.5).

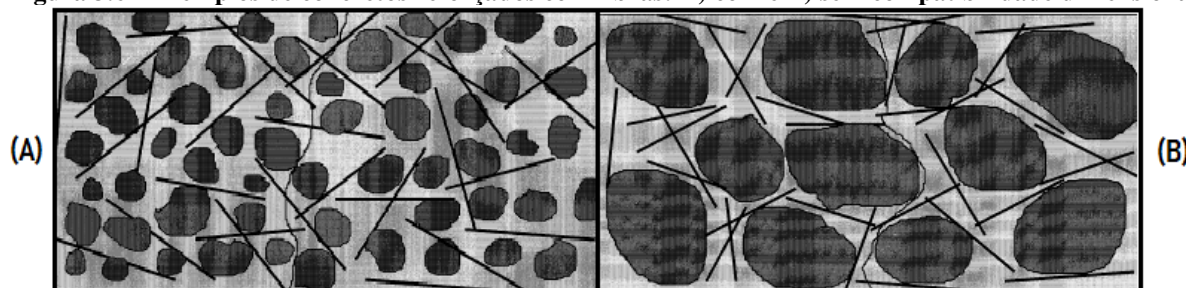


De acordo com a Figura 3.5, após um trecho inicial correspondente ao comportamento elástico-linear do concreto no estágio pré-fissuração, o concreto passa a apresentar comportamentos que permitem identificar os diversos teores de fibras incorporados na matriz. Quando dosado com o $V_{crítico}$ de fibras, o comportamento apresentado pelo concreto reforçado se assemelha ao do aço, com patamar de escoamento definido e a resistência pós-fissuração se mantém praticamente constante. Por outro lado, se o teor de fibras for superior ao volume crítico, o compósito apresentará ganho de resistência após a fissuração; para dosagens inferiores ao volume crítico, a resistência pós-fissuração será inferior à resistência do concreto à primeira fissura. Tomando o concreto convencional como referência, o concreto reforçado com fibras, em qualquer volume de incorporação, apresentará maior tenacidade.

Outro aspecto importante é a compatibilidade dimensional entre o comprimento da fibra e o diâmetro máximo do agregado graúdo para garantir que a adição atue efetivamente como reforço do concreto, sendo capaz de interceptar as fissuras que venham a ocorrer no concreto. Uma vez fissurado, a falha presente no concreto tende a se propagar pela zona de transição. E para que haja a transferência de tensões proporcionada pelo efeito ponte, as fibras devem possuir comprimento suficiente para facilitar o seu posicionamento em relação à direção de propagação da fissura. Em geral, o comprimento mínimo ideal para as fibras é definido como duas vezes a dimensão máxima do agregado (FIGUEIREDO, 2000).

Na Figura 3.6-A é apresentado um desenho esquemático de concreto cujas fibras incorporadas foram selecionadas considerando a compatibilidade dimensional. Por sua vez, a Figura 3.6-B ilustra um concreto em que as fibras não respeitam a compatibilidade mínima dimensional entre fibra e agregado. Neste caso, a quantidade de fibras interceptando a fissura é consideravelmente menor do que no caso anterior.

Figura 3.6 - Exemplos de concretos reforçados com fibras: A) com e B) sem compatibilidade dimensional



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000)

3.3 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO

A redução da trabalhabilidade do concreto em relação à adição de qualquer tipo de fibra é notória, havendo razoável proporcionalidade entre o volume de fibras incorporado e a perda de trabalhabilidade do concreto. Isto ocorre porque a presença da fibra aumenta a estabilidade da massa de concreto no estado fresco, aumentando sua compacidade.

Observa-se que menores teores tendem a interferir menos na trabalhabilidade do concreto, reduzindo a chance de distribuição não homogênea. Segundo ACI 544.1R (2009), para taxas típicas de incorporação de fibras, variando de 0,25 a 1,5% do volume de concreto, a adição destas pode causar redução de 25 até 102 milímetros no abatimento do concreto. Diversos estudos do CRFA confirmam a tendência de redução do abatimento em razão do aumento do volume de fibras incorporadas (ABBASS; KHAN; MOURAD, 2018; MOHOD, 2012; SAMARAKOON *et al.*, 2019; SANTANA, 2014; YAZICI; INAN; TABAK, 2007).

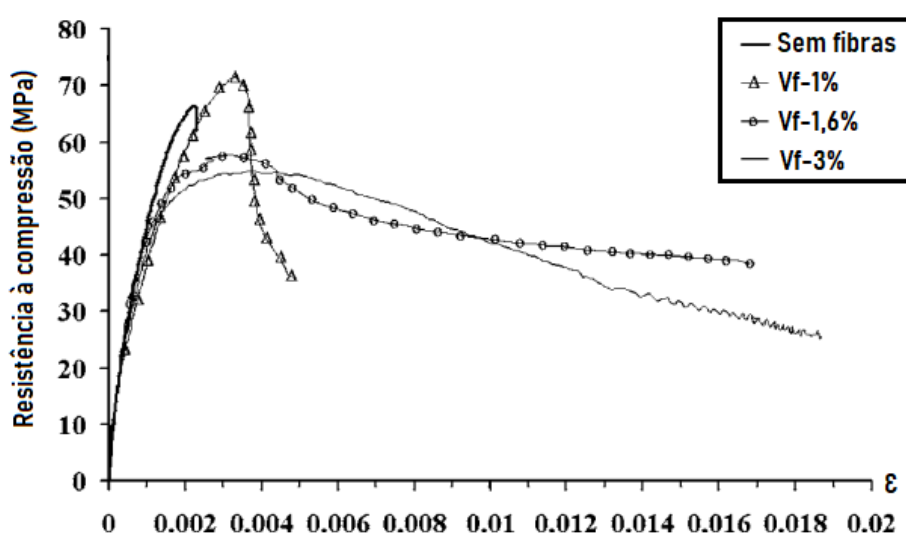
A razão de aspecto da fibra (l/d) é outro fator importante na trabalhabilidade do concreto, de modo que fibras com baixa razão de aspecto tem menos influência na trabalhabilidade da mistura. Por outro lado, fibras com razão de aspecto maior que 100 tendem a formar emaranhados (ouríços) durante a mistura do concreto, os quais dificilmente serão separados utilizando apenas o processo de vibração (ACI 544.1R, 2009).

Tendo em vista a influência do volume e da razão de aspecto das fibras na trabalhabilidade do concreto, recomenda-se que a incorporação de fibras fique limitada a 2% do volume de concreto, com uma razão de aspecto máxima igual a 100 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.4 INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO

O concreto simples apresenta baixa resistência e pequena capacidade de deformação quando submetido a esforços de tração, praticamente não desenvolvendo deformações plásticas, o que evidencia seu comportamento frágil. Por sua vez, no concreto reforçado com fibras, mesmo que a adição de reforço não seja relevante para o aumento da resistência à compressão, sua presença na mistura auxilia no controle da fragmentação do concreto após o início da fissuração, conferindo ao material notável resistência pós fissuração (Figura 3.7).

Figura 3.7 – Comportamento do concreto comprimido axialmente



Fonte: adaptado de Bencardino *et al.* (2008)

Assim, o impacto da adição de fibras na resistência à compressão do concreto é variável. Segundo o ACI 544.1R (2009), a resistência à compressão é sutilmente afetada pela incorporação de fibras, apresentando até 15% de aumento para misturas com até 1,5% de fibras por volume de concreto. Ensaio conduzidos por Abass *et al.* (2018) em concretos de alta resistência reforçados com fibras de aço em taxas de 0,5 até 1,5% ratificaram esta tendência e indicaram um aumento de até 10% na resistência de concretos com resistência alvo de 90MPa; para concretos com resistência à compressão de 60 e 70MPa, observou-se aumento de até 25%.

Entretanto, para concretos reforçados com fibras em taxas superiores a 1,5%, a presença das fibras não mantém o mesmo impacto positivo na resistência à compressão do CRF. Um estudo realizado por Mohod (2012) com concretos de 30MPa reforçados com fibras de aço variando de 0,25 até 2% por volume exemplifica este comportamento. Para taxas de reforço de até 1% o CRF apresenta um ganho de resistência em relação ao concreto de referência, mas não

há variação significativa na resistência à compressão para CRF com dosagens de 1,5 e 2% de fibras. Song e Hwang (2004), ao produziram concretos de alta resistência com 0, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2% de fibras de aço, reportaram ganhos de resistência entre 7,1 e 15,3% para adições de um volume até 1,5%, enquanto o aumento não ultrapassou 12,9% para o concreto com 2% de fibras (atribuído à má dispersão do reforço na matriz cimentícia), indicando uma ligeira perda de eficácia com o aumento no teor de incorporação de 1,5% para 2%.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade do CRF, considerando as taxas recomendadas de incorporação de fibras ao concreto (até 2% por volume de concreto), não há diferença significativa em relação ao concreto simples (ACI 544.1R, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Ensaio de caracterização do concreto reforçado com fibras de aço incorporadas em taxas de 0,5%, 1%, 1,5% e 2% indicaram que, para uma mesma classe de resistência, o módulo de elasticidade correspondente aos traços com até 1,5% de fibras não apresentam variação significativa (LI e LI, 2019). Os CRF com resistências alvo de 35, 40, 65 e 85 MPa não apresentaram, em valores absolutos, variação maior que 2,5 GPa no módulo de elasticidade.

Em relação aos efeitos da incorporação de fibras no comportamento do concreto à tração, até o primeiro ponto de fratura, tanto o concreto simples quanto o reforçado com fibras respondem quase que linearmente à tensão aplicada. Porém, após este estágio inicial, a resposta dos compósitos à deformação é completamente distinta. O concreto sem adição de fibras apresenta queda brusca em sua capacidade de carga após a fratura. Por sua vez, o concreto reforçado com fibras apresenta resistência pós-fissuração e tenacidade consideráveis em função da atuação das fibras na seção fissurada. As fibras, de fato agem como uma “costura” transferindo as tensões atuantes na matriz e aumentando a absorção de energia do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo o ACI 544.1R (1996), o concreto reforçado com fibras em um teor igual a 1,5% pode atingir resistência à tração até 40% superior ao concreto simples. Por sua vez, Bentur e Mindess (2019) indicam que os melhores resultados em relação ao ganho de resistência à tração do concreto são obtidos quando adotadas fibras mais esbeltas, em dosagens de até 2% por volume de concreto. Ainda que a maior esbeltez das fibras prejudique a trabalhabilidade do concreto, sua capacidade de costura das fissuras é significativamente maior quando o comprimento é o suficiente para cobrir duas vezes o diâmetro característico do agregado, atendendo à anteriormente mencionada compatibilidade dimensional.

Ensaio de tração indireta em concretos com resistência alvo de 85MPa reforçados com fibras de aço com extremidades em gancho (0,5%, 1,0%, 1,5% e 2%) comprovaram o aumento da resistência à tração com o aumento do volume de fibras, indicando aumentos de 19% a 98,3% em relação ao concreto convencional (SONG e HWANG, 2004). De maneira análoga, Yazici *et al.* (2007) avaliaram a influência de diferentes razões de aspecto (l/d de 45, 65 e 80) e volumes de adição (V_f de 0,5; 1,0 e 1,5%) de fibras com ancoragem em gancho. Concluiu-se que, apesar da queda na trabalhabilidade à medida que a taxa de fibras de aço aumenta, os efeitos nos parâmetros resistentes do concreto foram significativos, já que as resistências à tração e à flexão aumentaram, respectivamente, na ordem de 11-54% e de 3-81%. Ainda, Holschemacher *et al.* (2010) ao avaliarem propriedades mecânicas de concretos de alta resistência reforçados com fibras com ancoragem em gancho e corrugadas, indicaram um aumento na resistência à tração indireta (ensaio de tração por compressão diametral). Além da resistência aumentar com o aumento do volume de fibras incorporado, os melhores resultados foram obtidos para fibras com ancoragem em gancho.

Dentre as propriedades mecânicas influenciadas pela incorporação de fibras no compósito, a tenacidade à flexão do CRF é a mais importante. Segundo Callister (2002), a tenacidade é uma medida da capacidade de determinado material absorver energia até a fratura. Para análise estática, a tenacidade pode ser obtida a partir dos resultados do ensaio de flexão à 4 pontos, o valor é numericamente igual a área sob a curva tensão *versus* deformação até o ponto da fratura.

Entretanto, essa definição fica incompleta para descrever o fenômeno da tenacidade no concreto reforçado com fibras. Uma vez que a fibra passa a atuar mais efetivamente após a fissuração do material, no concreto com fibras a tenacidade deve ser definida como a energia absorvida pelo compósito quando carregado, antes e após sua fissuração. O material com maior tenacidade deve possuir resistência mecânica e ductilidade, sendo que esta última é preponderante, pois indica certa resistência pós-fissuração e, conseqüentemente, aumento na absorção de energia. É por esta razão que o CRF deve ser interpretado como um material pseudo-dúctil ou não frágil, já que a presença das fibras como reforço modifica a fragilidade do compósito, prolongando a absorção de energia com a costura da fissuração da matriz.

Por fim, fica claro como a resposta das propriedades resistentes do concreto varia consideravelmente em função do aumento no teor de incorporação ou da sua geometria (razão de aspecto). Por essa razão, o desenvolvimento de modelos que auxiliem o processo de dosagem do concreto reforçado com fibras de aço é pertinente e pode contribuir consideravelmente com

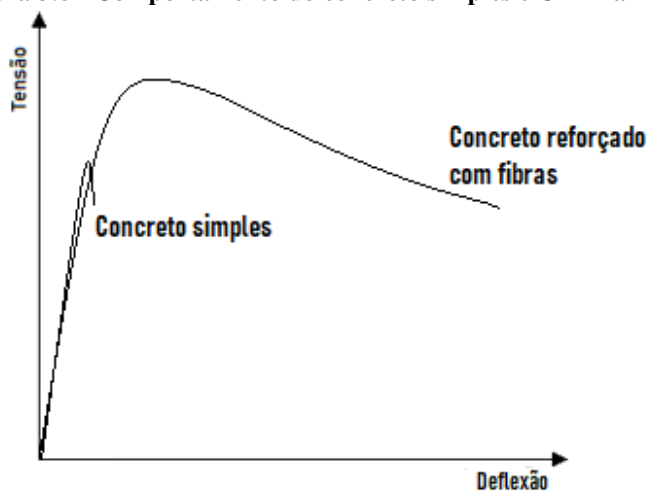
a popularização no emprego deste tipo de material. Neste sentido, utilizando redes neurais artificiais, Silva *et al.* (2022) desenvolveram um modelo de rede neural para estimativa da resistência à compressão, tração e flexão do CRFA a partir de 12 parâmetros do concreto e das fibras de aço, dentre eles o teor de fibras e sua razão de aspecto. A diferença encontrada pelos autores entre os valores estimados e experimentais para os três parâmetros considerados variou, em média, entre 7,24%, 6,43% e 12,74%, respectivamente.

3.5 COMENTÁRIOS FINAIS

A incorporação de fibras confere comportamento mais dúctil ao concreto influenciando diretamente no seu desempenho. Devido à elevada resistência à tração ($f_{ct} > 200 \text{MPa}$) e módulo de elasticidade ($E \geq 200 \text{GPa}$), visando aprimoramento no comportamento do concreto após início da fissuração, as fibras de aço são as mais indicadas como reforço. A transferência de tensões através das fissuras aumenta a resistência pós-fissuração do concreto; o “efeito ponte” redistribui as tensões na falha, controlando a propagação das fissuras.

Dentre as propriedades mecânicas do concreto, a tenacidade à flexão é a mais influenciada pela presença das fibras no concreto. Sabendo que a tenacidade de um material pode ser descrita como a capacidade de absorver energia até sua ruptura, a tenacidade do concreto reforçado com fibras é significativamente melhorada; há mudança no modo de falha, passando da ruptura frágil para ruptura dúctil (Figura 3.8). Ao adicionar até 2% de fibras, a energia total absorvida aumenta entre 10 e 40 vezes em relação ao concreto simples (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 3.8 - Comportamento do concreto simples e CRF na flexão



Tendo em vista o mecanismo de controle de fissuração promovido pelo efeito ponte no concreto reforçado com fibras, a inclusão destas como reforço é uma alternativa para contornar a queda de desempenho devida à fragilidade do agregado reciclado em relação ao concreto com agregado natural.

De acordo com a literatura, teores de adição entre 0,5 e 2,0% indicam ser os mais recomendados para reforço do concreto. A geometria do material, especificamente sua razão de aspecto, também se mostrou um importante fator na resposta resistente do concreto com reforço, sendo indicado como limite uma razão de aspecto não superior a 100. Quando superados esses valores recomendados, há maior possibilidade de má distribuição do reforço na matriz cimentícia e conseqüente formação de ouriços no interior do concreto, o que seria prejudicial pro desempenho mecânico do mesmo.

CAPÍTULO 4: CONCRETO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Neste capítulo, considerando os processos descritos na metodologia, nos itens a seguir são discutidos os principais achados observados em 52 documentos analisados na revisão sistemática da literatura sobre o comportamento do concreto reciclado reforçado com fibras de aço, com destaque para suas propriedades no estado fresco (trabalhabilidade) e endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração).

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

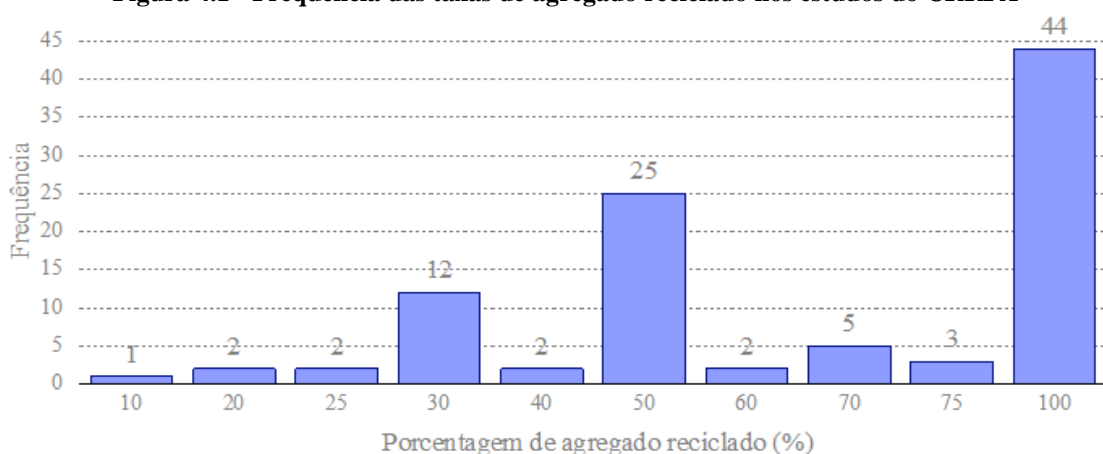
O uso do agregado reciclado na construção civil é uma estratégia eficiente para reduzir a extração de rochas pois permite o reaproveitamento de parte do volume de concreto descartado como resíduo sólido. O aspecto sustentável associado à utilização do agregado reciclado é importante pois impulsiona o seu emprego em novos concretos. Por outro lado, a natureza menos resistente em relação ao agregado natural, consequência da maior porosidade, é um dos entraves para a maior utilização do concreto reciclado.

Em razão dessas especificidades, o concreto reciclado tende a apresentar redução em algumas de suas propriedades mecânicas como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Em macro escala, a incorporação de fibras de aço ao concreto reciclado pode reduzir parte dos efeitos causados pelo uso dos agregados reciclados. A adição de fibras controla a fissuração da matriz e modifica o comportamento frágil do concreto para pseudo-dúctil. Assim, a combinação das fibras de aço com o concreto reciclado dá origem ao **concreto reciclado reforçado com fibras de aço (CRRFA)**.

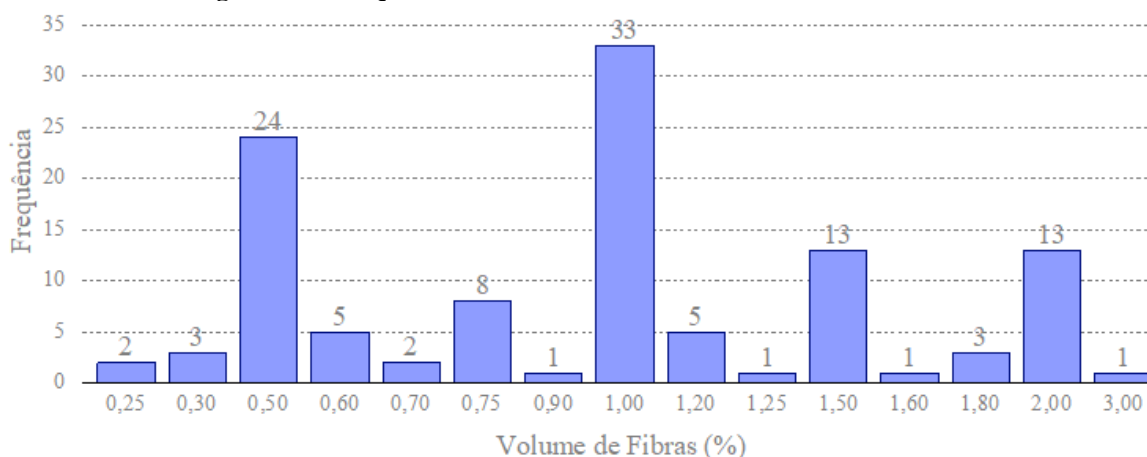
Além do aspecto ambiental, o emprego do agregado reciclado em combinação com fibras de aço também pode ser economicamente favorável. Alguns estudos reportam que a economia decorrente da substituição do agregado natural pelo reciclado chega a ser 2,5 vezes maior que os custos adicionais gerados pelo reforço com fibras de aço (SENARATNE *et al.*, 2016; XIE, JIANHE; ZHANG; *et al.*, 2018). Este aspecto econômico é um dos fatores que tem

impulsionado as pesquisas do concreto reciclado reforçado com fibras de aço (CRRFA). A relação entre o uso do agregado reciclado e as alterações nas propriedades mecânicas do concreto reciclado são investigadas levando em conta a qualidade do material que o origina e, principalmente, a taxa de substituição. Assim, considerando os 52 documentos utilizados neste estudo, taxas de agregado reciclado entre 10 e 100% foram investigadas, com predominância para substituições a partir de 50% (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Frequência das taxas de agregado reciclado nos estudos do CRRFA



Em relação ao volume de fibras de aço incorporado ao concreto, os teores variam entre 0,25 e 3%. Em razão da melhor distribuição na matriz cimentícia e consequente prevenção da formação de ouriços ou segregação do concreto, teores de fibra de até 1,5% por volume de concreto são os mais utilizados como reforço (Figura 4.2). Além disso, 1% de fibras foi o volume mais investigado (33 documentos) seguido pelo volume de 0,5% (24 documentos) correspondendo, respectivamente, a 63,4% e 46,1% do total de documentos avaliados (AFROUGHSABET *et al.*, 2017; ALI *et al.*, 2021; ASLANI *et al.*, 2019; CARNEIRO *et al.*, 2014; CHAND *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2014, 2016; FANG *et al.*, 2018; GHONEIM *et al.*, 2020; GHORPADE *et al.*, 2010; KANNAM *et al.*, 2018; KOUSHKBAGHI *et al.*, 2019; MEESALA, 2019; MOHSENI *et al.*, 2017; NALANTH *et al.*, 2014; NAZARIMOFRAD *et al.*, 2017; NITESH *et al.*, 2019; ORTIZ *et al.*, 2017; QURESHI *et al.*, 2020; RAMESH *et al.*, 2018; RAZZAGHI *et al.*, 2021; SENARATNE *et al.*, 2016, 2018; WANG *et al.*, 2021; XIAO *et al.*, 2019; XIE, JIAN HE *et al.*, 2015; XIE, JIANHE; ZHANG; *et al.*, 2018; ZHANG; PEI, 2017).

Figura 4.2 - Frequência de volumes de fibra adicionados ao CRRFA

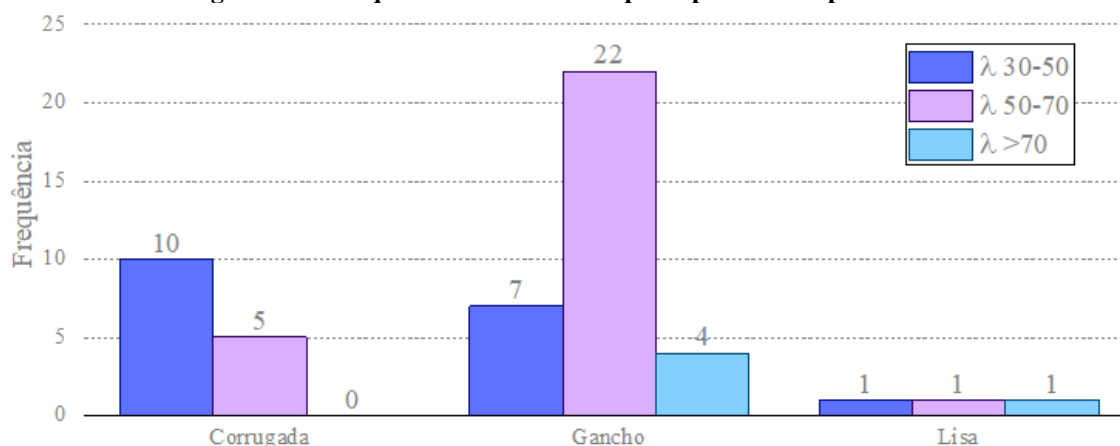
A revisão sistemática permitiu identificar três tipos de fibras de aço utilizadas para reforçar o concreto reciclado: com gancho (67,3% dos documentos), corrugada (28,8% dos documentos) e lisa (5,17% dos documentos). A frequência de documentos para cada tipo de fibra é mostrada na Tabela 4.1. A maior incidência das fibras com gancho ocorre porque a ancoragem nas extremidades melhora sua aderência mecânica ao concreto em relação às fibras lisa e corrugada.

Tabela 4.1 – Características e frequência de utilização das fibras de aço nos documentos

Tipo de fibra de aço	Frequência	Razão de aspecto (λ)	Comprimento (mm)
Corrugada	15	34,2-70	13-35
Gancho	35	37,5-100	25-62
Lisa	3	38-112	13-37
Não informado	5	-	-

Outro aspecto que influencia nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras é a razão de aspecto (relação entre o comprimento e o diâmetro nominal da fibra). Dentre os documentos avaliados, a razão de aspecto (λ) das fibras com gancho se concentra entre 50 e 70 enquanto nas fibras corrugadas a razão de aspecto (λ) varia entre 30 e 50 (Figura 4.3).

Figura 4.3 - Frequência da razão de aspecto para cada tipo de fibra



Assim como o teor de incorporação de fibras afeta a sua interação com a matriz cimentícia, a variação na relação de aspecto, para um mesmo tipo de fibra, pode produzir efeitos distintos no comportamento do concreto. Por exemplo, Nitesh *et al.* (2019) verificaram aumento na resistência à tração do concreto apenas variando a razão de aspecto das fibras com gancho. Os concretos reforçados com fibras de razão de aspecto (λ) entre 50 e 70 apresentaram resistência à tração 20% maior que o concreto simples. Com ganho de desempenho relativamente menor, a adição de fibras com $\lambda=100$ também provocou aumento na resistência à tração. Essa resposta indica que o aumento na geometria da fibra não reflete, necessariamente, um aumento proporcionalmente linear na resistência à tração do concreto. Como visto, há uma tendência de que quão maior for a razão de aspecto da fibra, maior será a dificuldade de homogeneização deste material na mistura, e por essa razão, é possível que uma fibra menos esbelta confira melhores resultados do que fibras maiores. Devido a essa maior dificuldade de homogeneização das fibras maiores, variações na geometria da fibra dentro de um intervalo para razão de aspecto entre 60 e 70 aparentam produzir os melhores resultados. Esse comportamento é indicado por Ghoneim *et al.* (2020) ao aumentar a razão de aspecto de fibras com gancho de 64 para 67, onde o concreto reforçado com fibras de razão de aspecto igual a 67 apresentou aumento na resistência à compressão, tração e flexão de 11,3%; 29,5% e 40,9%, respectivamente.

4.2 PROPRIEDADES DO CRRFA EM ESTADO FRESCO

A trabalhabilidade é uma forma bastante usual de avaliar o comportamento do concreto no estado fresco e correspondente à fluidez necessária para o adensamento completo, sem que ocorra exsudação ou segregação. Muitos aspectos interferem diretamente na trabalhabilidade,

por exemplo, tipo de cimento, água de amassamento, presença de adições, quantidade de agregados reciclados e, principalmente, sua porosidade. A adição de fibras é um fator singular para o comportamento do concreto em estado fresco uma vez que promove maior estabilidade à massa, aumenta sua compactidade e, por vezes, demanda o uso de aditivos superplastificantes para que atinja o nível de abatimento almejado. Resumidamente, a redução na trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço pode ser atribuída a: necessidade de maior volume de pasta de cimento para envolver as fibras; má dispersão das fibras no concreto e formação de estrutura ramificada no interior da matriz cimentícia, que inibe a fluidez da pasta cimentícia (FANG *et al.*, 2018; KACHOUH *et al.*, 2019; GAO *et al.*, 2020).

No caso do concreto reciclado, a grande porosidade do agregado reciclado e, portanto, a maior capacidade de absorção de água, reduz a trabalhabilidade do concreto (FANG *et al.*, 2018; KACHOUH; EL-HASSAN; EL-MAADDAWY, 2019; KOUSHKBAGHI *et al.*, 2019; MOHSENI *et al.*, 2017; RAMESH *et al.*, 2019; SU, 2020). A presença das fibras também reduz a trabalhabilidade do concreto. Por essa razão, concretos reciclados reforçados com fibras de aço tendem a apresentar significativa queda de trabalhabilidade devido a aumentos na taxa de substituição do agregado e do volume de fibras, como pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Variação no abatimento do concreto em função do agregado reciclado e das fibras de aço

Documento	a/c	Resistência agregado reciclado	Taxa agregado reciclado (%)	Tipo de fibra	Teor de fibras (%)	λ (l/d)	Adição	Aditivo SP	Abatim. (mm)
Yang e Wei (2013)	0,47	C30	100	Gancho	2,0	50	Não	N/I	40
Chen <i>et al.</i> (2014)	0,46	N/I	100	Corrugada	0,0-1,5	40	Não	6,6	187-110
Nalanth <i>et al.</i> (2014)	0,57	N/I	30-50	N/I	0,5-1,0	75	CV-30	8-9,5*	721-704
Nazarimoufrad <i>et al.</i> (2016)	0,40	C30-C40	0-100	Gancho	0,0-1,0	60	Não	2,14-4,43	80-30
Afrouhsabet <i>et al.</i> (2017)	0,30	C40-C80	0-100	Gancho	0,0-1,0	65	Não	5,5-7,00	225-130
Chand <i>et al.</i> (2017)	0,80-0,40	N/I	100	Corrugada	0,0-0,5	70	Não	N/I	694-653
Gao <i>et al.</i> (2017)	0,41-0,37	N/I	0-100	Gancho	0,0-2,0	54,6	Não	4,05-4,79	65-49
Gao <i>et al.</i> (2017)	0,41-0,31	C40-C50	0-100	Gancho	0,0-2,0	54,6	Não	3,15-5,48	65-48
Mohseni <i>et al.</i> (2017)	0,40	N/I	0-20	Gancho	0,0-1,0	66,7	Não	5-4	710-607
Ortiz <i>et al.</i> (2017)	0,41	N/I	100	Gancho	0,0-1,0	50	CV-14	6,8-7,3	660-480
Fang <i>et al.</i> (2018)	0,60	C40	0-50	Lisa	0,0-1,0	112	Não	2,2	110-61
Kannam <i>et al.</i> (2018)	0,30-0,28	N/I	0-100	Corrugada	0,0-0,5	60	CV-10	6,03-5,73	750-620
Ramesh <i>et al.</i> (2018)	0,40	N/I	0-100	Gancho	0,0-1,0	80	CV-26/48 SA-5	N/I	100-84
Aslani <i>et al.</i> (2019)	0,45	C30	100	Gancho	0,0-1,0	80	Não	2,96-1,48	780-610
Kachouc <i>et al.</i> (2019)	0,49	N/I	0-100	Gancho	0,0-3,0	65	CV-30 SA-7,5	N/I	150-0
Koushkbaghi <i>et al.</i> (2019)	0,35	N/I	0-100	Gancho	0,0-1,5	67	CCA-15	4-5	86-58
Li <i>et al.</i> (2019)	0,35-0,48	N/I	60	Corrugada	1,2-2,0	40	Não	2,24-4,08	150-130
Nitesh <i>et al.</i> (2019)	0,38-0,29	N/I	0-25	Gancho	0,0-0,5	50-100	CV-38/17 MS-7	4,2-6,0	760-660
Su (2020)	0,43	N/I	0-100	Lisa	0,0-1,0	38	Não	N/I	80-12
Ali <i>et al.</i> (2021)	0,35	C35	0-100	Gancho	0,0-1,0	38,9	CV-15/30	2,0-5,5	110-80

No campo de "Adições" na nomenclatura "Sigla-número" o primeiro termo se refere ao tipo de adição (CV - Cinza Volante; SA - Sílica Ativa; CCA - Cinza de Casca de Arroz; MS - Micro Sílica e FP - Fibra polipropileno), enquanto o segundo representa a porcentagem de incorporação;

a/c – relação água/cimento no concreto;

N/I – parâmetro não informado pelo(s) autor(es) do estudo em questão;

*Quantidade de aditivo superplastificante informado em litros.

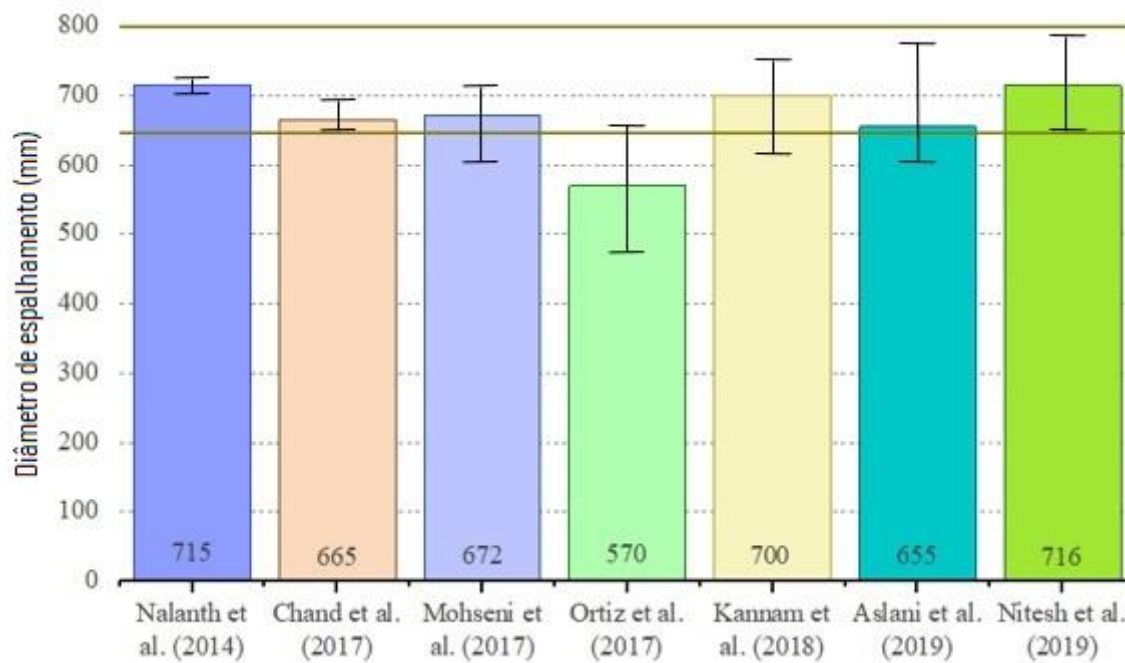
A redução na trabalhabilidade com o aumento do teor de fibras ocorre independentemente da quantidade de agregado reciclado na mistura ou da classe de resistência do concreto (Tabela 4.2). Por exemplo, os valores de abatimento encontrados por Ramesh *et al.* (2018) para concretos com diferentes percentuais de agregado reciclado (entre 30 e 100%), em combinação com teores crescentes de fibras de aço com gancho (0,3 a 1,0%), indicam redução de trabalhabilidade com o aumento no volume de fibras, independentemente da quantidade de agregado reciclado. De forma geral, ao manter constantes a relação a/c e a taxa de agregado reciclado, o aumento no teor de fibras causou reduções entre 10 e 47,8% na trabalhabilidade do CRRFA (ASLANI *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2014; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017b; LI; LI, 2019; MOHSENI *et al.*, 2017; SU, 2020). Analogamente, ao manter o volume de fibras constante e variar a razão de aspecto de 50 para 100, Nitesh *et al.* (2019) verificaram reduções entre 5 e 8% na trabalhabilidade.

O efeito da quantidade de agregado reciclado na trabalhabilidade do concreto com fibras é semelhante ao que ocorre no concreto simples (sem fibras de aço). Ao substituir 100% do agregado natural por agregado reciclado, mantendo em 1% o volume de fibras de aço com gancho na mistura, Gao *et al.* (2017) encontraram redução de 19,23% no abatimento. Entretanto, a magnitude da redução na trabalhabilidade ao aumentar a taxa de substituição não varia significativamente entre concretos com baixo teor de fibras e concretos simples. Por exemplo, concreto com 20% de agregado reciclado e 0% de fibras apresentou abatimento 5,35% menor que o concreto com agregados naturais; para a mesma variação no teor de agregado reciclado, o acréscimo de 1% de fibras de aço com gancho provocou redução de 6,75% (MOHSENI *et al.*, 2017). Efeito similar foi reportado por Kachouh *et al.* (2019) ao analisar a variação na trabalhabilidade para concretos com 0 e 100% de substituição: reduções de 17,49% e 18,31% ocorreram, respectivamente, para concretos com 0 e 1,5% de fibras com gancho.

Práticas como a incorporação de uma quantidade extra de água à mistura de concreto ou o aumento do volume de aditivo superplastificante são formas de mitigar a perda de trabalhabilidade em resposta à presença do agregado reciclado e das fibras. Outra opção é combinar o concreto reciclado autoadensável com as fibras uma vez que a maior fluidez deste tipo de concreto minimiza os problemas de adensamento decorrentes das fibras e do agregado reciclado. A Figura 4.4 apresenta os valores médios e a variação no abatimento (mm) de concretos reciclados autoadensáveis reforçados com fibras de aço. Na mesma figura também é indicado o intervalo (650 a 800mm) recomendado pela EFNARC (*European Federation of*

National Associations Representing for Concrete) para boa trabalhabilidade deste tipo de concreto.

Figura 4.4 – Diâmetro de espalhamento médio, mínimo e máximo de concretos autoadensáveis reciclados reforçados com fibras de aço



Estudos de Chand *et al.* (2017), Nalanth *et al.* (2014) e Nitesh *et al.* (2019) de concretos autoadensáveis com até 100% de agregado reciclado e reforçados com um volume de fibras entre 0,5 e 1,0%, os valores do diâmetro de espalhamento se mantiveram no intervalo recomendado pela EFNARC para concretos com boa trabalhabilidade. Em contrapartida, outros documentos apontaram maior variação nos valores de trabalhabilidade e algumas misturas de concreto apresentaram diâmetro de espalhamento inferior ao recomendado pela regulamentação europeia (ASLANI *et al.*, 2019; KANNAM; SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; MOHSENI *et al.*, 2017; ORTIZ *et al.*, 2017). Medidas inferiores a 650mm não necessariamente inviabilizam a utilização do concreto, sendo necessária a avaliação de fatores como densidade de armadura do elemento estrutural, distância do ponto de lançamento do concreto até a fôrma e aspectos geométricos da fôrma (EFNARC, 2002).

4.3 PROPRIEDADES DO CRRFA EM ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Comportamento sob compressão

A presença do agregado reciclado interfere no comportamento do concreto sob tensões de compressão. Uma vez que a resistência do concreto reciclado está intrinsecamente associada

às características do agregado reciclado, da matriz cimentícia e, principalmente, à interação agregado-matriz na zona de transição pasta-agregado, a qualidade do agregado reciclado adquire grande notoriedade.

A maior porosidade e fragilidade do agregado reciclado está diretamente ligada à parcela de argamassa aderida à superfície do agregado e às diferentes zonas de transição pasta-agregado. Assim, é consenso que a qualidade do agregado reciclado e sua taxa de substituição interferem na resistência à compressão do concreto (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; SEARA-PAZ *et al.*, 2014).

Devido à interação entre a argamassa aderida ao agregado reciclado e a nova pasta cimentícia, surge uma nova zona de transição, mais porosa, que interfere no comportamento do concreto ocasionando redução do módulo de elasticidade. A redução ocorre porque a matriz cimentícia com mais vazios aumenta a deformação do concreto sob compressão, reduzindo sua rigidez. Substituições de até 30% não produzem reduções significativas nas propriedades elásticas do concreto. Entretanto, maiores taxas de substituição podem ocasionar reduções de até 35% (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; GAO *et al.*, 2021; MOHAMMED; NAJIM, 2020; PACHECO *et al.*, 2019; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; XIAO *et al.*, 2018).

No concreto reciclado reforçado com fibras de aço, ao costurar as fissuras, as fibras podem contribuir, de forma indireta, para o aumento da resistência à compressão (GAO *et al.*, 2021; GHALEHNOVI *et al.*, 2021; MEESALA, 2019; NITESH; RAO; KUMAR, 2019; ZONG *et al.*, 2021). Em síntese, é fato que a qualidade do agregado reciclado bem como variações na taxa de substituição, no volume incorporado, razão de aspecto da fibra e presença de adições minerais implicam em oscilação considerável tanto na resistência à compressão (f_c) quanto no módulo de elasticidade (E) do concreto reciclado.

Na Tabela 4.3 são apresentadas variações de resistência à compressão e módulo de elasticidade do CRRFA em função de parâmetros como taxa de substituição do agregado natural pelo reciclado, classe de resistência do concreto que originou o agregado reciclado, volume e razão de aspecto (λ) das fibras de aço.

Tabela 4.3 - Variação na resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto reciclado reforçado com fibras de aço

Documento	a/c	Taxa agregado reciclado (%)	Resistência agregado reciclado	Tipo de fibra	Teor de fibras (%)	λ (l/d)	Adição	f_c (MPa)*	E (GPa)*
Ghorpade e Rao (2010)	0,60	0-100	N/I	N/I	0,00-1,25	100	Não	23,3-34,1	-
Carneiro <i>et al.</i> (2014)	0,54	0-25	N/I	Gancho	0,75	65	Não	34,3-36,9	30,9-28,5
Chen <i>et al.</i> (2014)	0,46	100	N/I	Corrugada	0,00-1,50	40	Não	39,6-43,7	27,2-20,9
Nalanth <i>et al.</i> (2014)	0,57	30-50	N/I	N/I	0,50-1,00	75	CV-30	29,5-23,2	-
Xie <i>et al.</i> (2015)	0,35	0-100	N/I	Corrugada	1,00	45	Não	73,5-53,1	55,4-28,6
Chen <i>et al.</i> (2016)	0,46	100	N/I	Corrugada	0,00-1,50	40	Não	57,9-52,3	24,1-18,7
Nazarimoufrad <i>et al.</i> (2016)	0,40	0-100	C30-C40	Gancho	0,00-1,00	60	Não	40,5-64,8	-
Senaratne <i>et al.</i> (2016)	0,35	0-100	N/I	N/I	0,00-0,60	N/I	Não	35,8-53,1	-
Afroughsabet <i>et al.</i> (2017)	0,30	0-100	C40-C80	Gancho	0,00-1,00	65	Não	77,4-96,4	-
Chand <i>et al.</i> (2017)	0,80-0,40	100	N/I	Corrugada	0,00-0,50	70	Não	31,2-74,7	-
Gao <i>et al.</i> (2017)	0,41-0,37	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	54,6	Não	37,4-44,6	29,7-42,9
Gao <i>et al.</i> (2017)	0,41-0,37	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	54,6	Não	34,7-62,3	29,7-44,2
Mohseni <i>et al.</i> (2017)	0,40	0-20	N/I	Gancho	0,00-1,00	66,7	CV-14	51,8-53,9	-
Ortiz <i>et al.</i> (2017)	0,41	100	N/I	Gancho	0,00-1,00	50	Não	42,2-38,1	-
Zhang e Pei (2017)	0,25	0-30	N/I	Gancho	0,00-1,00	60	CV-20 SA-10	79,8-72,9	54,3-42,7
Chaboki <i>et al.</i> (2018)	0,41	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	N/I	Não	39,9-35,6	-
Fang <i>et al.</i> (2018)	0,60	0-50	C40	Lisa	0,00-1,00	112	CV-10	30,2-36,6	31,0-35,9
Gao e Zhang (2018)	0,41-0,31	0-100	C40-C50	Gancho	0,00-2,00	54,6	Não	34,7-62,3	29,7-44,2
Kannam <i>et al.</i> (2018)	0,28-0,30	0-100	N/I	Corrugada	0,00-0,50	60	CV-26/48 SA-5	36,5-83,4	-
Ramesh <i>et al.</i> (2018)	0,40	0-100	N/I	Gancho	0,00-1,00	80	Não	48,8-34,8	31,6-18,3
Xiao <i>et al.</i> (2018)	0,48	0-100	C30	Gancho	0,00-1,00	55	Não	39,9-32,3	37,3-24,7
Xie <i>et al.</i> (2018)	0,48	100	C20	Corrugada	0,00-1,00	45	Não	45,7-36,1	46,6-37,2
Xie <i>et al.</i> (2018)	0,48	0-100	C20	Corrugada	0,00-1,00	65	SA-4/8/12	40,6-49,0	22,9-23,8
Aslani <i>et al.</i> (2019)	0,45	100	C30	Gancho	0,00-1,00	80	CV-30 SA-7.5	50,4-25,6	29,5-12,4

Tabela 4.3 - Variação na resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto reciclado reforçado com fibras de aço (continuação)

Documento	a/c	Taxa agregado reciclado (%)	Resistência agregado reciclado	Tipo de fibra	Teor de fibras (%)	λ (l/d)	Adição	f_c (MPa)*	E (GPa)*
Chaboki <i>et al.</i> (2019)	0,41	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	N/I	Não	37,4-35,7	-
Kachouc <i>et al.</i> (2019)	0,49	0-100	-	Gancho	0,00-2,00	65	Não	36,4-24,7	-
Koushkbaghi <i>et al.</i> (2019)	0,35	0-100	N/I	Gancho	0,00-1,50	67	CCA-15	40,0-56,5	-
Li <i>et al.</i> (2019)	0,35-0,48	60	N/I	Corrugada	1,20-2,00	40	Não	22,6-38,4	33,8-28,3
Liu <i>et al.</i> (2019)	0,53-0,41	50-100	C40	Gancho	0,00-1,80	57,6	CV-30	38,4-78,9	-
Meesala <i>et al.</i> (2019)	0,45	0-50	C40	Gancho	0,00-0,75	50	Não	38,6-45,0	24,3-36,4
Nitesh <i>et al.</i> (2019)	0,38-0,29	0-25	N/I	Gancho	0,00-0,50	50-100	CV-17/38 MS-7	20,3-83,2	-
Chan <i>et al.</i> (2020)	0,45	0-100	N/I	Gancho	0,25-0,75	80	Não	24,7-54,9	-
Gao <i>et al.</i> (2020)	0,41-0,31	0-100	C30-C50	Gancho	0,00-1,50	54,6	Não	62,3-34,7	46,2-28,8
Gao <i>et al.</i> (2020)	0,39	0-100	C30-C50	Gancho	0,00-1,50	64	FP-0,1	61,1-49,7	-
Ghoneim <i>et al.</i> (2020)	0,20	100	N/I	Gancho	0,00-0,75	64-67	SA-5	64,5-75,7	-
He <i>et al.</i> (2020)	0,35	100	N/I	Corrugada	0,00-1,50	60	Não	49,2-60,4	-
Li <i>et al.</i> (2020)	0,49	60	N/I	Corrugada	0,00-2,00	40	Não	27,7-28,5	20,8-25,3
Liu <i>et al.</i> (2020)	0,33-0,23	0-100	C40	Gancho	0,00-1,80	57,6	CV-30	38,4-78,9	-
Qureshi <i>et al.</i> (2020)	0,35	100	C35-C40	Gancho	0,00-1,00	40	Não	44,2-46,7	28,1-28,8
Su (2020)	0,43	0-100	N/I	Lisa	0,00-1,00	38	Não	39,8-48,5	-
Toghroli <i>et al.</i> (2020)	0,34	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	63	SA-10	10,5-29,6	-
Wang <i>et al.</i> (2020)	0,52	0-100	C30	Lisa	0,00-1,00	65	SA-4/8/12	49,9-40,6	-
Ali <i>et al.</i> (2021)	0,35	0-100	C35	Gancho	0,00-1,00	38,9	CV - 15/30	42,9-63,4	-
Gao <i>et al.</i> (2021)	0,40	0-100	N/I	Gancho	0,00-1,50	64	Não	40,7-45,5	22,5-29,3
Ghalehnovi <i>et al.</i> (2021)	0,41	0-100	N/I	N/I	0,00-2,00	N/I	Não	37,4-35,9	-
Wang <i>et al.</i> (2021)	0,38-0,58	0-100	N/I	Corrugada	0,00-0,90	58,3	Não	22,6-42,9	-
Zong <i>et al.</i> (2021)	0,33	0-100	C30	Gancho	0,00-1,80	57,6	CV-30	36,8-52,5	-

No campo de "Adições" na nomenclatura "Sigla-número" o primeiro termo se refere ao tipo de adição (CV - Cinza Volante; SA - Sílica Ativa; CCA - Cinza de Casca de Arroz; MS - Micro Sílica e FP - Fibra polipropileno), enquanto o segundo corresponde a porcentagem de incorporação;

a/c – relação água/cimento no concreto;

N/I – parâmetro não informado pelo(s) autor(es) do estudo em questão;

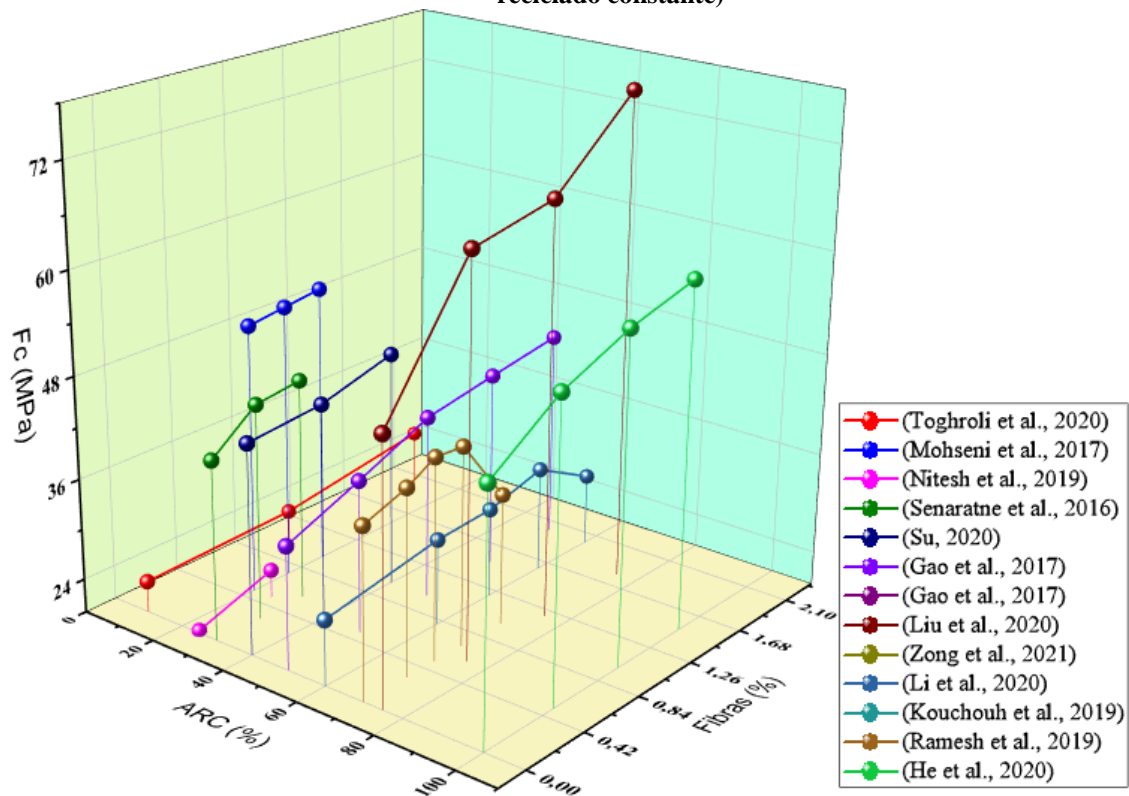
*Valores extremos considerando todas as variáveis.

Considerando a taxa de substituição como parâmetro, o conjunto de documentos aponta redução na resistência à compressão do concreto com o aumento na taxa de substituição, variando de pequenas oscilações a reduções de até 30% em relação ao concreto convencional (ALI *et al.*, 2021; BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; CHABOKI *et al.*, 2018, 2019; GHALEHNOVI *et al.*, 2021; KANNAM; RAO SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; KOUSHKBAGHI *et al.*, 2019; MEESALA, 2019; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; SENARATNE *et al.*, 2016; SU, 2020; TOGHROLI *et al.*, 2020; ZONG *et al.*, 2021). Como apresentado na Tabela 4.3, no caso do concreto reciclado reforçado com fibras pode ocorrer, indiretamente, aumento na resistência à compressão devido à malha rígida formada pelas fibras imersas no concreto. Entretanto, esse efeito não deve ser generalizado. Teores de fibra maiores que o usualmente recomendado (até 1,5%) interferem na distribuição das fibras na mistura, dificultando a aderência com a pasta cimentícia e levando ao enfraquecimento de algumas regiões do concreto. Esta sequência de efeitos reduz a resistência à compressão do concreto (ZONG *et al.*, 2021).

De acordo com resultados experimentais de concretos com agregado reciclado e fibras de aço, vide Tabela 4.3 a adição de fibras aumenta a resistência à compressão (AFROUGHSAKET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; CHAND *et al.*, 2017; FANG; HONG; ZHANG, 2018; GAO; ZHANG; *et al.*, 2020; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017a; GHALEHNOVI *et al.*, 2021; HE *et al.*, 2020; KANNAM; RAO SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; KOUSHKBAGHI *et al.*, 2019; LIU, ZHENZHEN *et al.*, 2020; MEESALA, 2019; MOHSENI *et al.*, 2017; NAZARIMOFRAD; SHAIKH; NILI, 2017; QURESHI; ALI; ALI, 2020; SENARATNE *et al.*, 2016; TOGHROLI *et al.*, 2020; WANG, JUNJIE *et al.*, 2020; WANG, QIAO HUAN *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2019; ZHANG; PEI, 2017; ZONG *et al.*, 2021). A mistura avaliada por Meesala *et al.* (2019) e contendo 50% de agregado reciclado (produzido a partir de um concreto C40) com 0,75% de fibras com gancho apresentou acréscimo de 40,55% na resistência à compressão medida no ensaio com espécime cúbico, saltando de 28,56 MPa para 40,14 MPa. Do mesmo modo, concretos reforçados com 1,8% de fibras corrugadas e contendo 50 e 100% de agregado reciclado apresentaram aumentos de 30,0% e 32,6%, respectivamente (WANG *et al.*, 2021). A combinação de agregado reciclado e fibras lisas investigada por Wang *et al.* (2020) resultou em acréscimo de 15,9% na resistência à compressão, também aferido com espécimes cúbicos. Os resultados mostram que pode ocorrer aumento indireto na resistência à compressão do concreto seja pela utilização da fibra com gancho, corrugada ou lisa. De forma geral, mantida constante

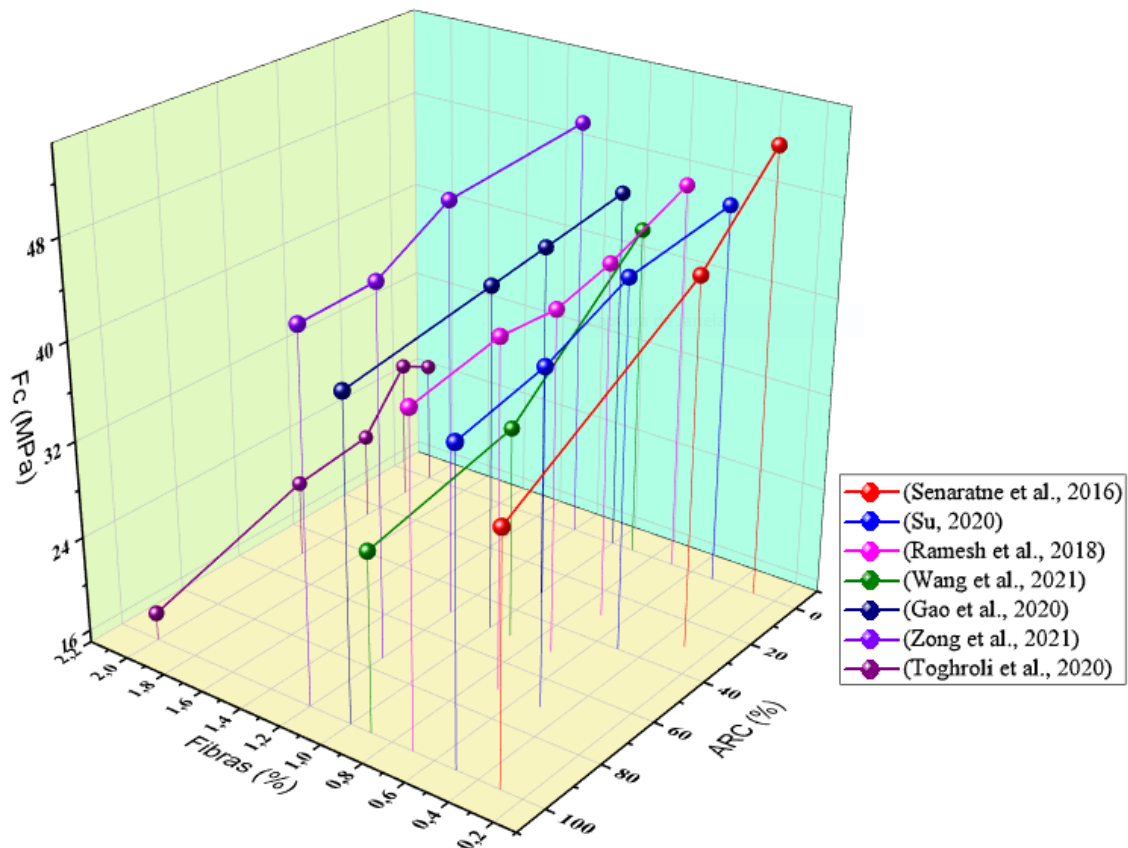
a taxa de agregado reciclado, um aumento no teor de fibras incorporadas à mistura tende a melhorar o comportamento à compressão do concreto, independentemente do teor de substituição, conforme ilustra a Figura 4.5.

Figura 4.5 – Influência do teor de fibras de aço na resistência à compressão do concreto (taxa de agregado reciclado constante)



Por sua vez, ao manter constante o volume de fibras e aumentar a taxa de agregado reciclado, diversos estudos mostram redução na resistência à compressão (f_c) (GAO; YAN; *et al.*, 2020; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; SENARATNE *et al.*, 2016; SU, 2020; TOGHROLI *et al.*, 2020; WANG, QIAO HUAN *et al.*, 2021; ZONG *et al.*, 2021). Isto ocorre em razão da acentuação do comportamento frágil do concreto devido à predominância do agregado reciclado de concreto (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Influência do teor de agregado reciclado de concreto na resistência à compressão do concreto (volume de fibras constante)

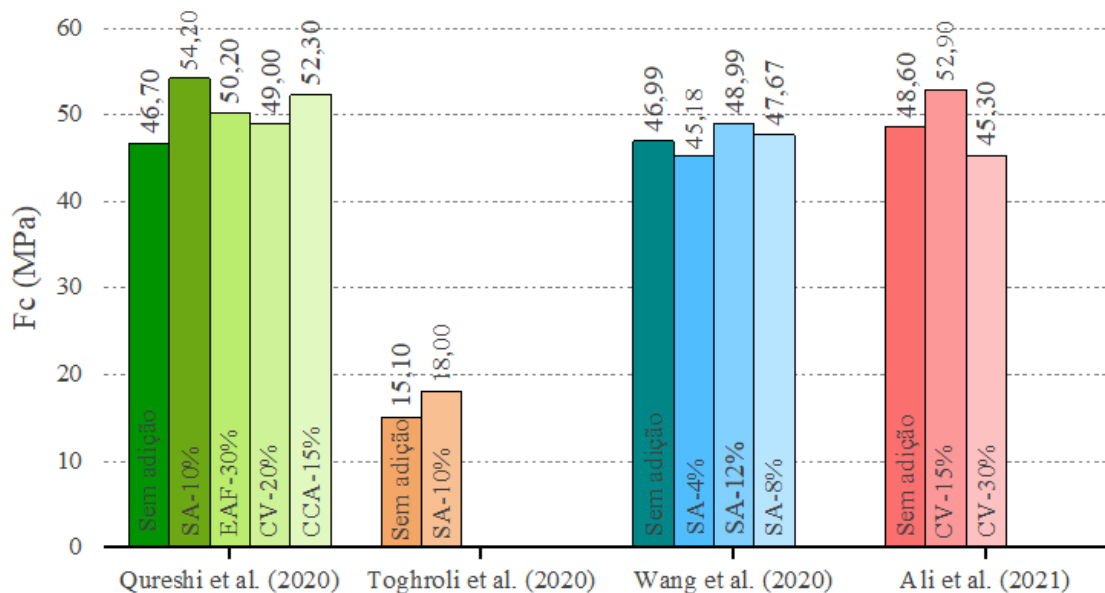


Em concretos com altos teores de agregado reciclado, a má homogeneização das fibras e consequente formação de ouriços na matriz cimentícia é apontada como causa provável de reduções na resistência à compressão do concreto (ASLANI *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2016; GAO; ZHANG; *et al.*, 2020; GHALEHNOVI *et al.*, 2021; NITESH; RAO; KUMAR, 2019; ORTIZ *et al.*, 2017; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; XIE, JIANHE; HUANG; *et al.*, 2018). Neste sentido, Aslani *et al.* (2019) reportaram a maior redução da resistência à compressão (47,2%) para concretos com 100% de agregado reciclado e 1% de fibras com gancho; essa redução foi atribuída à formação de ouriços na matriz devido à elevada razão de aspecto ($\lambda=80$). Efeito semelhante foi observado por Nitesh *et al.* (2019) ao aumentar a razão de aspecto com gancho de 50 para 100. Neste caso, o concreto com 25% de substituição do agregado natural e 0,5% de fibras com razão de aspecto 50 apresentou reduções de resistência à compressão entre 3,01 e 7,59% em relação a mesma mistura com fibra menor ($\lambda=100$), evidenciando a sensibilidade do concreto ao aumento da razão de aspecto das fibras.

As adições minerais são, basicamente, materiais silicosos (mais finos que o grão de cimento) que reagem com os produtos da hidratação do cimento Portland (reação pozolânica),

modificando a microestrutura do material e proporcionando o tamponamento dos poros existentes. Este efeito resulta em aumentos de densidade e resistência do concreto (KOUSHBAGHI *et al.*, 2019; QURESHI; ALI; ALI, 2020; TOGHROLI *et al.*, 2020; WANG, JUNJIE *et al.*, 2020). Considerando a natureza porosa do agregado reciclado, o efeito deste tipo de adição ao CRRFA tem sido amplamente investigado. Conforme ilustrado na Figura 4.7, as adições de diferentes materiais pozolânicos (SA – Sílica Ativa; EAF – Escória de Alto Forno; CV – Cinza volante e CCA – Cinza de Casca de Arroz) se mostraram muito eficientes para o aumento da resistência do concreto à compressão.

Figura 4.7 – Resistência à compressão de concretos com 100% de agregado reciclado, 1% de fibra de aço e diferentes adições minerais



Ao analisar o efeito de diferentes adições em concretos reciclados com substituição total e reforçados com 1% de fibras, Qureshi *et al.* (2020) observaram aumento da resistência para todas as pozolonas avaliadas. Contudo, a mistura com sílica ativa, também utilizada por Toghrol et al. (2020), alcançou o melhor resultado. Similarmente, Liu et al. (2020) verificaram aumento de 77,6% na resistência à compressão do concreto com 75% de agregado reciclado e 30% de cinza volante ao aumentar o volume de fibras de aço com gancho de 0,6 para 1,8%. Por sua vez, conforme resultados de Ali *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2020), assim como ocorre para o volume de fibras adicionado à mistura, a adição mineral possui um teor ótimo de incorporação; quando este teor é ultrapassado pode levar à redução na resistência à compressão do concreto.

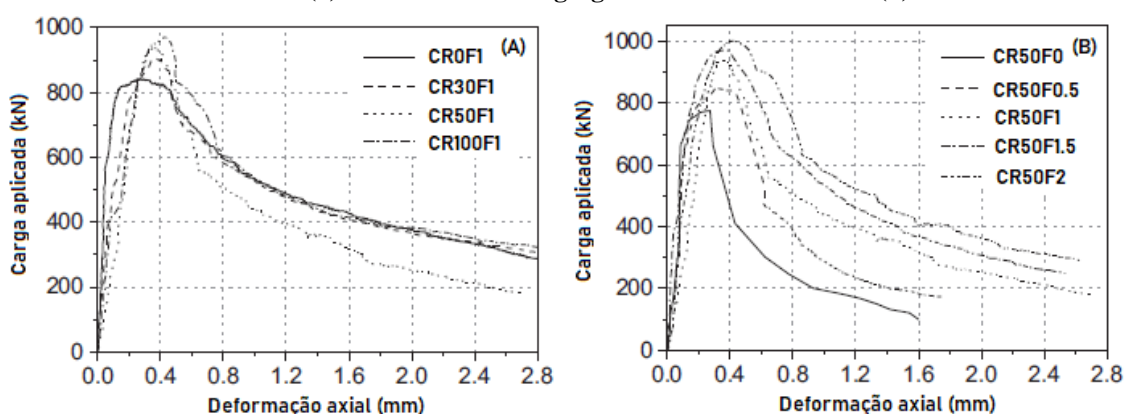
Mantidos constantes a taxa de agregado reciclado e o teor de fibras, concretos com agregados oriundos de britagem de concretos velhos de alta resistência apresentam maior resistência à compressão (AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017a; NAZARIMOFRAD; SHAIKH; NILI, 2017). Por exemplo, Nazarimofrad et al. (2017) ao utilizarem agregados reciclados derivados de concretos C30 e C40, encontraram maior resistência nas misturas com agregado reciclado de concreto C40, tanto para o concreto com 1,0% de fibras quanto para o concreto sem fibras. Analogamente, Afroughsabet et al. (2017) ao avaliarem concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de matrizes com classes de resistência C40 e C80, indicaram maiores resistências nas misturas com agregados derivados do concreto mais resistente. Neste caso, considerando o concreto com agregado C80, a resistência à compressão foi 2,8% e 3,4% maior do que o concreto confeccionado com agregados naturais, para a mistura sem reforço e com 1% fibras de aço, respectivamente.

De acordo com Meesala (2019), a adição de fibras ao concreto reciclado pode aumentar o módulo elástico (E), elevando-o ao mesmo patamar do concreto produzido com agregado natural. Isto ocorre porque o decréscimo observado no módulo de elasticidade do concreto devido ao agregado reciclado é compensado pela incorporação das fibras. Por exemplo, concretos reforçados com diferentes tipos de fibras apresentaram aumentos de até 35,77% com a incorporação de 0,75% de fibras de aço com gancho (MEESALA, 2019). De maneira geral, volumes de fibras (com ancoragem em gancho, corrugadas ou lisas) entre 0,5-2,0% resultaram em aumento de 1,73 até 55,89% no módulo de elasticidade do concreto reciclado reforçado com fibras em relação ao concreto reciclado sem fibras (FANG; HONG; ZHANG, 2018; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017b; MEESALA, 2019; QURESHI; ALI; ALI, 2020; XIE, JIANHE; HUANG; *et al.*, 2018). Assim como ocorre com a resistência à compressão, fibras com elevada razão de aspecto podem trazer dificuldade de homogeneização na pasta cimentícia e, conseqüentemente, se concentrarem em regiões específicas da matriz, fragilizando o material e reduzindo seu módulo de elasticidade. Por essa razão, reduções entre 0,96 e 57,93% são reportadas na literatura (ASLANI *et al.*, 2019; CHEN *et al.*, 2014, 2016; LI; LI, 2019; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; XIE, JIANHE; ZHANG; *et al.*, 2018; ZHANG; PEI, 2017), havendo redução mais significativa com o aumento da razão de aspecto da fibra, evidenciando a influência da geometria do reforço no módulo de elasticidade do concreto.

Em relação ao comportamento tensão *versus* deformação do concreto sob compressão axial, o aumento na taxa de agregado reciclado causa aumento na deformação correspondente

à força de pico. Por outro lado, a presença de fibras leva a um incremento na força máxima e na deformação correspondente, além de achatar o ramo descendente da curva tensão *versus* deformação (CHEN *et al.*, 2014; KACHOUH; EL-HASSAN; EL-MAADDAWY, 2019). Basicamente, a curva experimental tensão *versus* deformação pode ser dividida em 3 trechos com comportamentos característicos: o primeiro corresponde ao trecho inicial caracterizado por comportamento elástico linear; em seguida, um trecho de transição entre o ramo ascendente anterior e o ramo descendente subsequente, surgem as primeiras fissuras e não há proporcionalidade entre força e deformação até a força máxima; por fim, o terceiro trecho, que se inicia no ramo descendente onde a deformação se acentua e há decréscimo da resistência do material devido à fragmentação do concreto. Os três trechos podem ser identificados na Figura 4.8, seja para o concreto reciclado com teor de fibras constante (Figura 4.8a) como para o concreto com volume de agregado reciclado constante (Figura 4.8b).

Figura 4.8 – Comportamento sob compressão axial do concreto reciclado com volume de fibras constante (a) e com volume de agregado reciclado constante (b)



Fonte: Adaptado de Gao *et al.* (2017)

A linearidade entre a força aplicada e as deformações no trecho inicial do diagrama tensão *versus* deformação é relatada em diferentes estudos, independentemente da presença de fibras, confirmando que o comportamento do concreto até sua fissuração é regido, primordialmente, pela resistência da matriz cimentícia. Somente após o início da fissuração é que a presença das fibras passa a interferir efetivamente no comportamento do concreto (GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017b; MOHOD, 2012; ZONG *et al.*, 2021). Segundo Gao *et al.* (2017), para um volume de fibras constante, maiores taxas de agregado reciclado levam ao aumento na deformação correspondente ao início da fissuração, além de reduzir a tenacidade do concreto. Por sua vez, ao manter o teor de agregado reciclado constante e variar o volume de fibras, há aumento significativo da resistência ao início da fissuração. Esta resposta está em concordância

com os achados de Kachouh et al. (2019) que indicaram aumento entre 4% e 7% na força última para cada 1% de fibra de aço adicionada à mistura. Adicionalmente, o aumento no volume de fibras no concreto reciclado diminui a magnitude das deformações com o aumento da tensão aplicada ao longo do ensaio após o início da fissuração (descrito na literatura como achatamento deste segmento na curva tensão *versus* deformação), no trecho correspondente à tensão residual, indicando que um maior volume de fibras ocasionará uma maior capacidade de absorção de energia pelo concreto. Este achado de Kachouh et al. (2019) corrobora com aqueles de Ramesh et al. (2018) ao verificarem aumento de até 105% na tenacidade do concreto sob compressão com 1% de fibras.

4.3.2 Comportamento sob tração

A presença de agregado reciclado causa redução na resistência à tração do concreto. Tal como descrito no comportamento à compressão, a existência de uma zona adicional de transição, localizada entre a argamassa aderida ao agregado e a nova pasta de cimento, cria uma região preferencial para o surgimento de fissuras (AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017). Em razão disso, a adição de fibras de aço amplia a capacidade de redistribuir as tensões na matriz cimentícia e controlar a fissuração, melhorando substancialmente o comportamento sob tração (CARNEIRO *et al.*, 2014; GAO; ZHANG, 2018; NAZARIMOFRAD *et al.* 2017).

Na Tabela 4.4 são apresentadas as variações de resistência à tração (obtidas em ensaios de tração por compressão diametral e tração direta) e tração na flexão reportadas nos estudos considerados nesta revisão.

Tabela 4.4 - Variações na resistência à tração por compressão diametral ($F_{ct,sp}$) e na flexão ($F_{ct,fl}$) do concreto reciclado reforçado com fibras de aço

Autores	a/c	Taxa agregado reciclado (%)	Resistência agregado reciclado	Tipo de fibra	Teor de fibras (%)	λ (l/d)	Adição	$f_{ct,sp}$ (MPa)*	$f_{ct,fl}$ (MPa)*
Ghorpade e Rao (2010)	0,60	0-100	N/I	N/I	0,00-1,25	100	Não	2,59-4,12	3,48-5,66
Yang e Wei (2013)	0,47	100	C30	Gancho	2,00	50	Não	-	7,64
Carneiro <i>et al.</i> (2014)	0,54	0-25	N/I	Gancho	0,75	65	Não	3,96-3,87	3,92-4,62
Nalanth <i>et al.</i> (2014)	0,57	30-50	N/I	N/I	0,50-1,00	75	CV-30	2,99-2,94	3,20-3,50
Xie <i>et al.</i> (2015)	0,35	0-100	N/I	Corrugada	1,00	45	Não	-	8,50-7,80
Nazarimufрад <i>et al.</i> (2016)	0,40	0-100	C30-C40	Gancho	0,00-1,00	60	Não	2,52-7,58	-
Afroughsabet <i>et al.</i> (2017)	0,30	0-100	C40-C80	Gancho	0,00-1,00	65	Não	4,51-8,14	7,13-14,1
Chand <i>et al.</i> (2017)	0,80-0,40	100	N/I	Corrugada	0,00-0,50	70	Não	2,38-6,98	3,48-6,22
Gao <i>et al.</i> (2017)	0,31-0,54	0-100	C40-C50	Gancho	0,00-2,00	54,6	Não	2,77-7,61	-
Mohseni <i>et al.</i> (2017)	0,40	0-20	N/I	Gancho	0,00-1,00	66,7	CV-14	3,70-6,20	-
Ortiz <i>et al.</i> (2017)	0,41	100	N/I	Gancho	0,00-1,00	50	Não	-	4,80-5,24
Zhang e Pei (2017)	0,25	0-30	N/I	Gancho	0,00-1,00	60	CV-20 SA-10	4,87-3,54	-
Chaboki <i>et al.</i> (2018)	0,41	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	N/I	Não	3,78-5,05	-
Fang <i>et al.</i> (2018)	0,60	0-50	C40	Lisa	0,00-1,00	112	CV-10	4,00-4,18	-
Kannam <i>et al.</i> (2018)	0,28-0,30	0-100	N/I	Corrugada	0,00-1,00	60	CV-26/48 SA-5	3,67-7,85	3,68-7,41
Ramesh <i>et al.</i> (2018)	0,40	0-100	N/I	Gancho	0,001,00	80	Não	2,90-7,70	-
Aslani <i>et al.</i> (2019)	0,45	100	C30	Gancho	0,00-1,00	80	CV-30 SA-7.5	3,70-3,24**	-
Chaboki <i>et al.</i> (2019)	0,41	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	N/I	Não	-	3,78-5,01
Koushkbaghi <i>et al.</i> (2019)	0,35	0-100	N/I	Gancho	0,00-1,50	67	CCA-15	4,90-6,80	-
Li <i>et al.</i> (2019)	0,35-0,48	60	N/I	Corrugada	1,20-2,00	40	Não	1,97-2,41	-
Meesala <i>et al.</i> (2019)	0,45	0-50	C40	Gancho	0,00-0,75	50	Não	2,80-4,60	3,40-8,20
Nitesh <i>et al.</i> (2019)	0,38-0,29	0-25	N/I	Gancho	0,00-0,50	50-100	CV-38/17 MS-7	5,52-2,15	-
Chan <i>et al.</i> (2020)	0,45	0-100	N/I	Gancho	0,25-0,75	80	Não	-	2,41-6,18

Tabela 4.4 - Variações na resistência à tração por compressão diametral ($F_{ct,sp}$) e na flexão ($F_{ct,f}$) do concreto reciclado reforçado com fibras de aço (continuação)

Autores	a/c	Taxa agregado reciclado (%)	Resistência agregado reciclado	Tipo de fibra	Teor de fibras (%)	λ (l/d)	Adição	$f_{ct,sp}$ (MPa)*	$f_{ct,f}$ (MPa)*
Gao <i>et al.</i> (2020)	0,39	0-100	C30-C50	Gancho	0,00-1,50	64	FP-0,1	2,23-6,58	-
Ghoneim <i>et al.</i> (2020)	0,20	100	N/I	Gancho	0,00-0,75	64-67	SA-5	2,77-6,19	6,25-10,89
He <i>et al.</i> (2020)	0,35	100	N/I	Corrugada	0,00-1,50	60	Não	2,82-3,67	3,9-5,17
Li <i>et al.</i> (2020)	0,49	60	N/I	Corrugada	0,00-2,00	40	Não	2,41-3,46	-
Qureshi <i>et al.</i> (2020)	0,35	100	C35-C40	Gancho	0,00-1,00	40	Não	3,80-4,70	-
Su (2020)	0,43	0-100	N/I	Lisa	0,00-1,00	38	Não	2,22-3,69	4,86-6,42
Toghroli <i>et al.</i> (2020)	0,34	0-100	N/I	Gancho	0,00-2,00	63	SA-10	-	0,90-2,73
Ali <i>et al.</i> (2021)	0,35	0-100	C35	Gancho	0,00-1,00	38,9	CV-15/30	3,40-5,70	4,50-8,90
Gao <i>et al.</i> (2021)	0,40	0-100	N/I	Gancho	0,00-1,50	64	Não	4,16-8,11	-
Zong <i>et al.</i> (2021)	0,33	0-100	C30	Gancho	0,00-1,80	57,6	CV-30	1,95-4,34**	

$F_{ct,sp}$ - Resistência a tração por compressão diametral; $F_{ct,f}$ - Resistência à tração na flexão;

a/c - relação água/cimento no concreto;

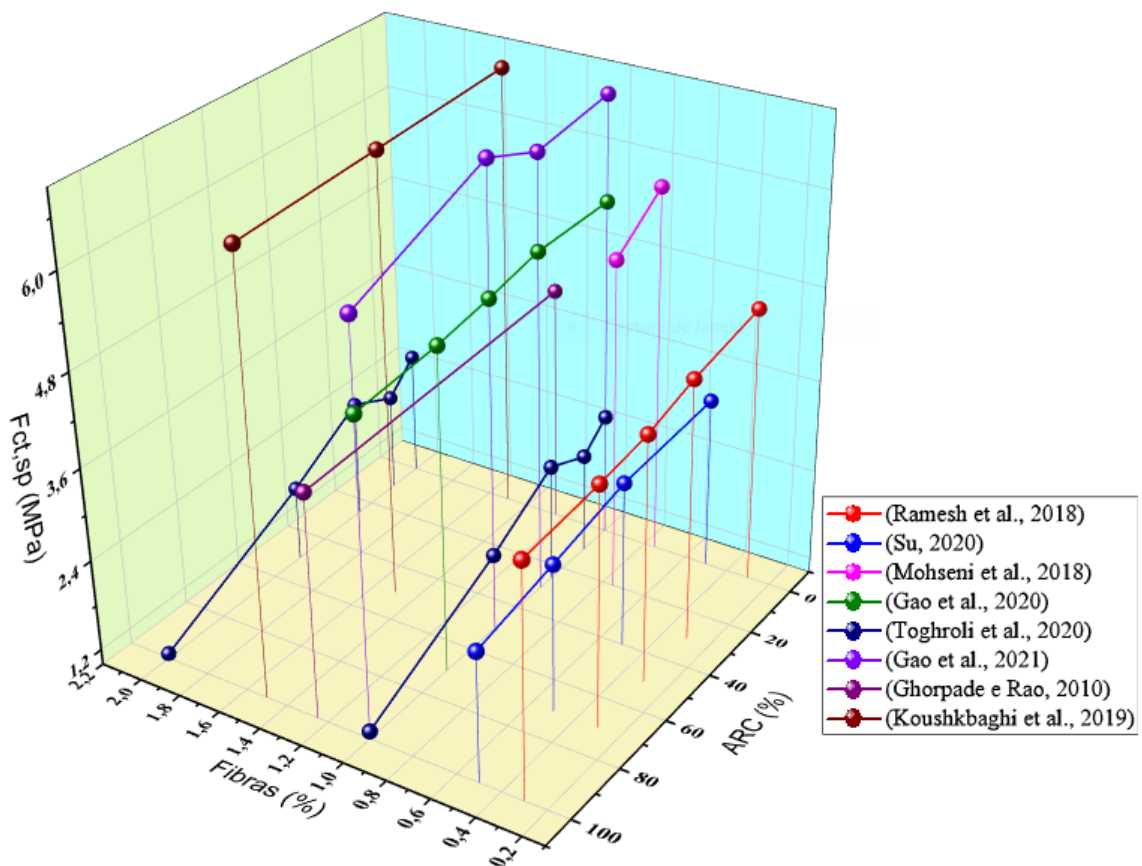
N/I - parâmetro não informado pelo(s) autor(es) do estudo em questão;

* Valores extremos considerando todas as variáveis;

** Resistência obtida através do ensaio de tração direta F_{ct} .

A redução na resistência à tração com o aumento do teor de agregado reciclado, mantendo o volume de fibras constante, é recorrente nos resultados analisados (Figura 4.9). Com um teor de fibras igual a 0,75%, o concreto com 25% de substituição de agregado reciclado, avaliado por Carneiro *et al.* (2014), apresentou valores de resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão respectivamente, 7,77 e 2,27%, inferiores ao concreto com agregados naturais. Para o mesmo volume de fibras, ao aumentar o teor de agregado reciclado para 50%, Meesala (2019) encontrou reduções de 13,04% e 9,75%, respectivamente nas resistências do concreto à tração indireta e à tração na flexão. Com 100% de agregados reciclados e 1% de fibras, a queda na resistência à tração foi de 29,87% (RAMESH; MIRZA; KANG, 2018).

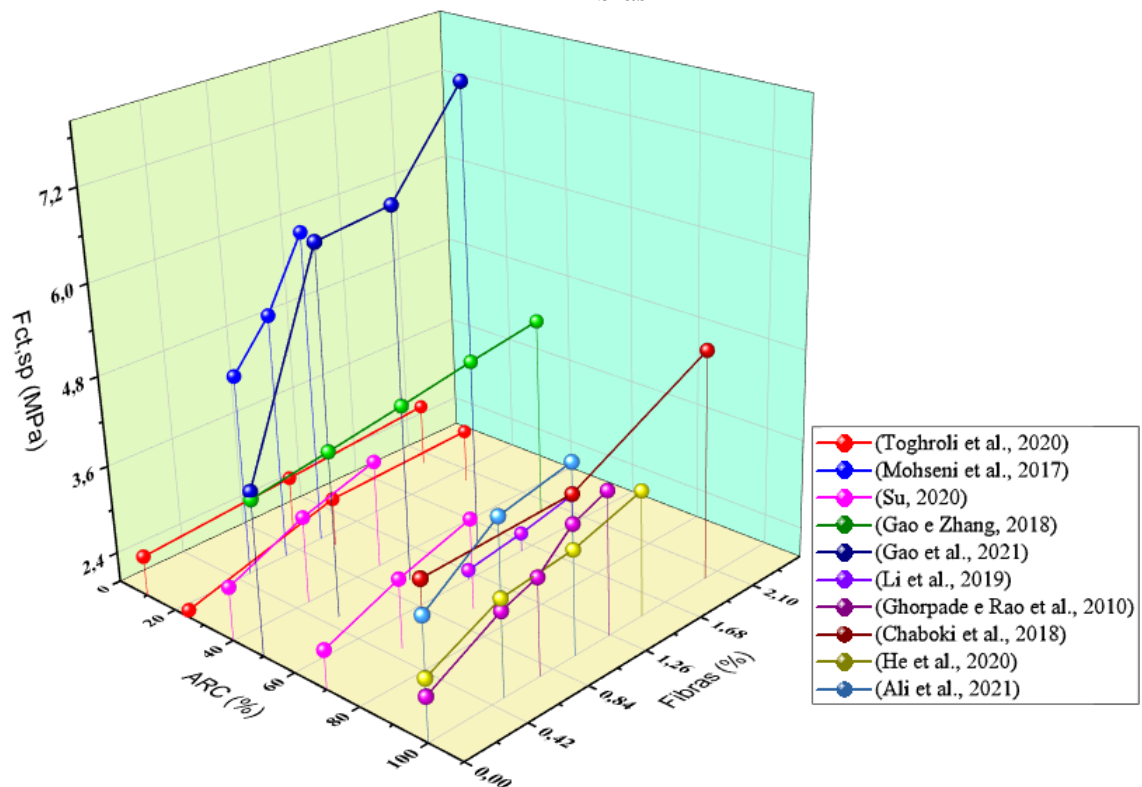
Figura 4.9 - Redução na resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) com o aumento na taxa de agregado reciclado



Por sua vez, ao avaliar o efeito da adição de fibras de aço na resistência do concreto com agregado reciclado sob tração e flexão, um aumento de resistência à tração é observado (Figura 4.10). Devido ao controle na deterioração da matriz cimentícia, a presença das fibras pode promover, indiretamente, aumento na resistência à compressão do concreto, mas é no comportamento do concreto à tração que sua atuação é mais evidente. Os resultados disponíveis

na literatura indicam aumentos substanciais na resistência à tração por compressão diametral nos concretos com agregado reciclado reforçados com fibras de aço, chegando a aumentos de até 189,68% em relação ao concreto sem fibras (AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; ALI *et al.*, 2021; CHABOKI *et al.*, 2018, 2019; CHAN; LIU; GALO BARDES, 2020; FANG; HONG; ZHANG, 2018; GAO *et al.*, 2021; GAO; YAN; *et al.*, 2020; GAO; ZHANG, 2018; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017b; GHONEIM *et al.*, 2020; GHORPADE; SUDARSANA RAO, 2010; KANNAM; RAO SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; KOUSHKBAGHI *et al.*, 2019; MEESALA, 2019; MOHSENI *et al.*, 2017; NAZARIMOFRAD; SHAIKH; NILI, 2017; ORTIZ *et al.*, 2017; QURESHI; ALI; ALI, 2020; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; SU, 2020; TOGHROLI *et al.*, 2020; XIE, JIANHE; HUANG; *et al.*, 2018). Do mesmo modo, em relação ao efeito do reforço na resistência à tração do concreto sob flexão, concretos reciclados reforçados com fibras de aço atingiram resistências até 117,65% maiores que os correspondentes sem fibras (AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; ALI *et al.*, 2021; CHAND *et al.*, 2017; GHONEIM *et al.*, 2020; GHORPADE; SUDARSANA RAO, 2010; HE *et al.*, 2020; KANNAM; RAO SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; MEESALA, 2019; SU, 2020).

Figura 4.10 - Variação na resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) com aumento no volume de fibras



O ganho de resistência à tração com a inclusão das fibras no concreto reciclado independe do tipo de ancoragem da fibra (lisa, corrugada e com gancho), sendo predominante a utilização de fibras com razão de aspecto (λ) entre 40 e 60. De acordo com Su (2020), a adição de 1,0% de fibras de aço lisas a um concreto com 100% de agregado reciclado elevou a resistência à tração de 2,22 MPa para 3,08 MPa e a resistência à flexão de 4,86 para 5,74 MPa. Estes valores correspondem a aumentos de 38,74 e 18,11%, respectivamente. Para o mesmo teor de substituição (100%), a adição de 1,5% de fibras corrugadas elevou as resistências à tração e à flexão do concreto em até 30% (HE *et al.*, 2020). A depender do tipo de ancoragem da fibra, pode surgir uma resistência adicional ao arrancamento; de acordo com os resultados da literatura, as fibras com gancho conferem os maiores aumentos de resistência. Variando o teor de fibras de 0 a 1,5%, Gao e Zhang (2018) encontraram aumento superior a 100% na resistência à tração de concretos com 50% e 100% de agregado reciclado. Aumento similar foi reportado por Nazarimofrad *et al.* (2017) ao aumentar o volume de fibras de 0 para 1%.

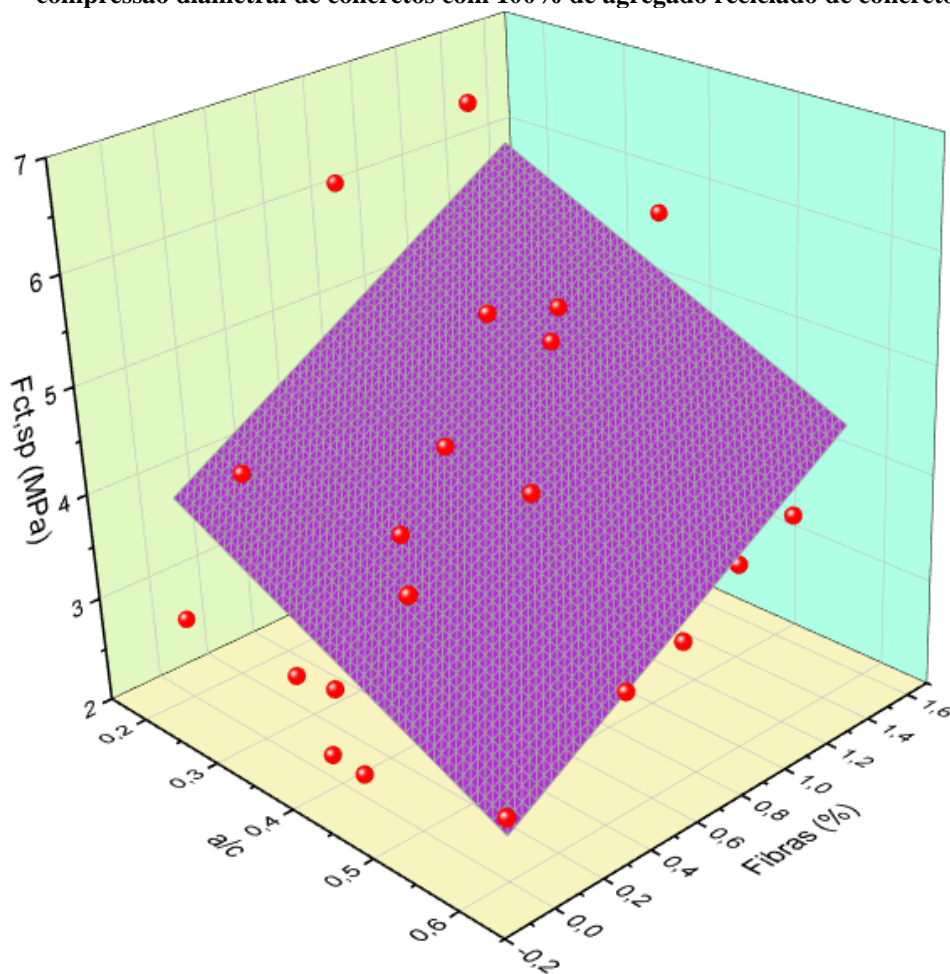
No que compete às adições minerais, concretos com 10% de sílica ativa (TOGHROLI *et al.*, 2020) e 15% ou 30% de cinza volante (ALI *et al.*, 2021) apresentaram resistência à tração (e também à flexão no caso do último estudo) ligeiramente superior ao concreto com mesmas taxa de agregado reciclado e volume de fibras, porém sem adição mineral. Qureshi *et al.* (2020) investigaram o efeito combinado das fibras de aço com gancho e diversas adições minerais (sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante e cinza de casca de arroz) no concreto com agregado reciclado, reportando aumentos de 2,63% a 14,89% na resistência. Contudo, a combinação mais eficiente correspondeu à combinação de 1% de fibras de aço com gancho e 10% de sílica ativa (QURESHI *et al.*, 2020). Em relação ao efeito da adição mineral na resistência à tração, independentemente do tipo de pozolana adicionada à mistura, não houve mudança significativa na resposta do concreto reciclado reforçado com fibras de aço.

Ainda, tal qual ocorre no comportamento à compressão, a qualidade do agregado reciclado também pode interferir no desempenho do CRRFA sob tração. Segundo Afroughsabet *et al.* (2017), ao investigar a resistência à tração de concretos com 50 e 100% de agregado reciclado derivado de matrizes com resistência à compressão de 40 e 80 MPa, o concreto com agregado de maior resistência (C80) apresentou resistência à tração até 6% superior ao concreto com agregados naturais. Por outro lado, o concreto com ARC-C40 apresentou resistência menor, com variação entre 4 e 11%. Esse comportamento do concreto reciclado com agregados oriundos de concretos de alta resistência decorre da menor porosidade da argamassa aderida ao agregado reciclado fazendo com que a interface entre a nova argamassa e este material aderido

seja mais resistente diminuindo, conseqüentemente, a fragilidade da zona de transição entre o agregado e a nova matriz cimentícia.

De modo geral, com base nos resultados da literatura, o aumento na resistência à tração com o incremento no teor de fibras independe da classe de resistência do concreto (AFROUGHSABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; CHAND *et al.*, 2017; GAO; YAN; *et al.*, 2020; GHONEIM *et al.*, 2020; GHORPADE; SUDARSANA RAO, 2010; HE *et al.*, 2020; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; SU, 2020). Todavia, conforme ilustra a Figura 4.11, mantida a taxa de agregado reciclado constante (100% de substituição), concretos com fator a/c menores apresentam aumentos mais significativos de resistência à tração ($f_{ct,sp}$ – tração por compressão diametral) quando há adição de fibras, indicando maior sensibilidade dos concretos mais resistentes à incorporação de fibras de aço.

Figura 4.11 – Influência da relação água-cimento e do volume de fibras na resistência à tração por compressão diametral de concretos com 100% de agregado reciclado de concreto



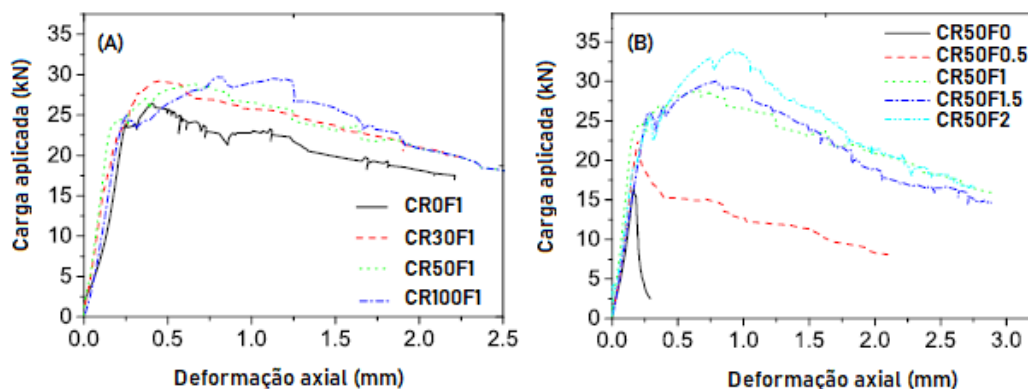
Contudo, seja pela incompatibilidade entre a geometria da fibra e a do agregado ou pela adição de um volume excessivo, a incorporação de fibras pode interferir negativamente no

desempenho do concreto à tração. Ainda que exista uma tendência recorrente de aumento da resistência à tração do concreto em resposta ao aumento no teor de fibras incorporado à mistura, é possível que em determinados casos, principalmente em razão da interação fibra e matriz cimentícia, teores menores de adição produzam melhores resultados. Como exemplo, no concreto reciclado com substituição total do agregado investigado por Aslani *et al.* (2019) apresentou resistência à tração 15% maior com um teor de 0,75% de fibras de aço em comparação com a mistura com 1% de fibras (3,83 MPa e 3,24 MPa, respectivamente). Por sua vez, Nitesh *et al.* (2019) ao investigarem o efeito da razão de aspecto da fibra no concreto reciclado, identificou redução entre 2,5% e 5,5% na resistência à tração ao aumentar de 50 para 100 a razão de aspecto das fibras. Como visto, variações no volume de incorporação e geometria da fibra interferem na sua capacidade de aderir à pasta cimentícia. Isto ocorre porque quanto maior a concentração de material descontínuo ou a esbeltez da fibra, maior deve ser o cuidado durante o processo de homogeneização da mistura. Quando mal distribuídas, as fibras podem se aglomerar e criar obstruções à passagem do concreto entre as barras de armadura dos elementos, podendo levar ao surgimento de patologias na estrutura.

Em relação à curva tensão *versus* deformação do CRRFA sob tensões de tração, o comportamento do concreto reforçado com fibras difere categoricamente do concreto simples (sem fibras). Enquanto o concreto convencional ou com agregado reciclado apresenta falha abrupta e, uma vez superada a resistência à tração da matriz, não apresenta nenhuma resistência, o concreto com fibras tende a apresentar ruptura dúctil e resistência residual após a fissuração. Este efeito prolonga a absorção de energia do concreto após a ruptura da matriz cimentícia. Este comportamento foi relatado por Zong *et al.* (2021) ao observar ensaios de tração direta de concretos com diferentes taxas de agregado reciclado (50, 75 e 100%). Nestes concretos, após atingir a resistência máxima, o material rompe e não é capaz de absorver nenhuma tensão. Entretanto, quando reforçado com volumes diversos de fibras de aço (0,6; 1,2 e 1,8%) a resposta do concreto indicou, além de aumento na resistência (até 55,9% maior), maior capacidade de absorver tensões após o início da fissuração da matriz, configurando ganho substancial de tenacidade (entre 5,7 e 13,3 vezes maior que a energia absorvida pelo concreto sem fibras). Efeito similar foi relatado por Gao e Zhang (2018) que identificaram aumento substancial na resistência pós-fissuração do concreto ao manter a taxa de agregado reciclado constante e variar o volume de fibras entre 0 a 2,0%. Os autores observaram mudança na inclinação do ramo descendente (pós fissuração) nas curvas correspondentes a concretos reforçados com fibras (Figura 4.12-b). Este fenômeno pode ser identificado nas curvas tensão *versus* deformação pela

modificação do segmento pós-fissuração que, normalmente, apresentaria uma deformação mais acentuada com o aumento da tensão aplicada. Entretanto, com a presença das fibras e a capacidade destas em controlarem a deterioração do concreto, o concreto reforçado passa a apresentar maior capacidade de absorção de energia (tenacidade).

Figura 4.12 – Comportamento do concreto reciclado no ensaio de flexão com volume de fibras constante (a) e com volume de agregado reciclado constante (b)



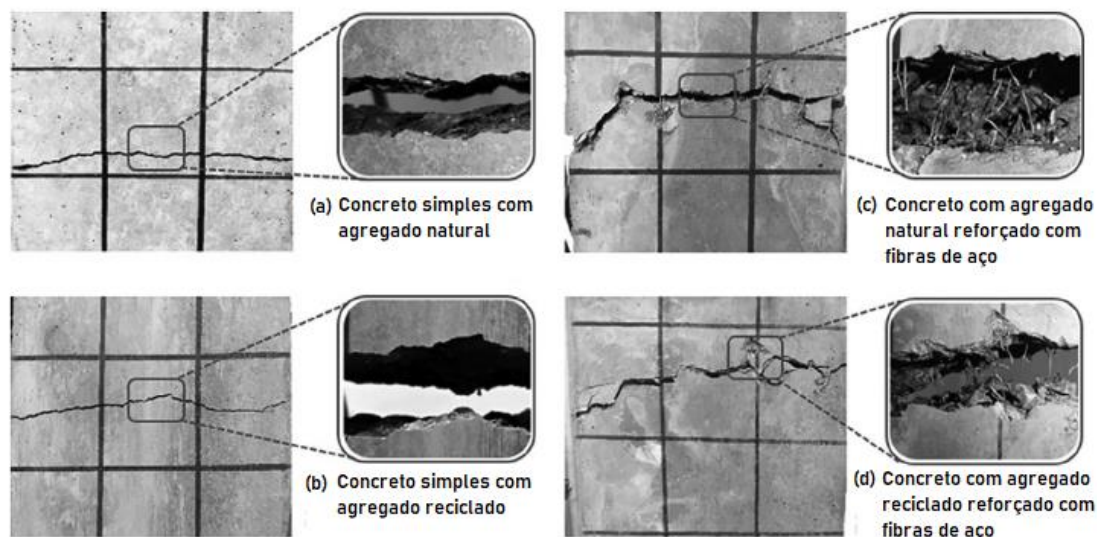
Fonte: Adaptado de Gao e Zhang (2018)

Mais que isso, ao manter o volume de fibras constante, o aumento no teor de agregado reciclado impactou positivamente na capacidade de absorção de energia do concreto fissurado (Figura 4.12-a), com tendência do concreto com maior teor de agregado reciclado resistir a forças maiores para uma mesma magnitude de deformação.

Essa mudança no comportamento do concreto é fruto da adição de fibras e se repete nas observações de diversos autores cujas fibras são utilizadas em conjunto com o agregado reciclado (AFROUGHSALET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; CHABOKI *et al.*, 2018; NAZARIMOFRAD; SHAIKH; NILI, 2017; TAN; ZHOU; ZHOU, 2020). A mudança do comportamento frágil para pseudo-dúctil decorrente da interação das fibras com a matriz de concreto convencional se repete no concreto reciclado. O principal mecanismo responsável por essa mudança de comportamento é a transferência de tensões através das fissuras, promovida pela estrutura tridimensional de reforço que as fibras formam no interior do concreto. Ao costurar as fissuras, que tendem a se desenvolver com o acréscimo de tensão no concreto, a presença das fibras confere ductilidade ao processo de ruptura do material com o sucessivo arrancamento delas na superfície de falha. Essa superfície, que em concretos sem reforço de fibras (seja o concreto convencional ou concreto reciclado) tende a se desenvolver em um plano quase horizontal (Figura 4.13 a,b), apresenta modificações com a incorporação das fibras, pois

estas desviam as tensões das extremidades das microfissuras, alterando a inclinação (Figura 4.12 c,d) no plano de falha (ZONG *et al.*, 2021).

Figura 4.13 - Plano de falha: (a) concreto simples com agregados naturais; (b) concreto simples com agregado reciclado; (c) concreto com agregados naturais e reforçado com fibras e (d) concreto com agregados reciclados e reforçado com fibras



Fonte: Adaptado de Zong *et al.* (2021)

4.4 COMENTÁRIOS FINAIS

O atual estado da arte sobre o concreto reciclado reforçado com fibras de aço (CRRFA) indicou achados importantes sobre seu comportamento e resistência. A maior capacidade de absorver água faz com que o agregado reciclado interfira no comportamento do concreto reciclado em seu estado fresco, reduzindo sua trabalhabilidade. Do mesmo modo, a adição de fibras de aço ao concreto aumenta a estabilidade da mistura e reduz sua fluidez.

Os documentos apontam que no concreto submetido a tensões de compressão, a porosidade e microfissuras residuais do processo de produção do agregado reciclado reduzem a resistência, evidenciando seu comportamento frágil com o aumento da taxa de agregado reciclado. O controle da abertura de fissuras promovido pelo efeito ponte das fibras pode minimizar a redução da resistência à compressão associada ao agregado reciclado, além de aumentar consideravelmente a capacidade de absorção de energia. A combinação do agregado reciclado com fibras e adições minerais é uma boa alternativa de mistura. Em razão do efeito filler e da reação pozolânica, a presença de materiais silicosos melhora substancialmente a resistência do concreto à compressão. Ainda, enquanto o aumento na quantidade de agregado reciclado leva à redução na resistência à tração do concreto, a incorporação de fibras faz o efeito inverso, aumenta consideravelmente a resistência do concreto à tração. A ductilidade

proporcionada pelas fibras de aço modifica o comportamento frágil do concreto para “pseudo-dúctil”, conferindo significativa resistência pós-fissuração e, em vista disso, aumentando a tenacidade do material.

Efeitos negativos associados à inclusão das fibras no concreto reciclado foram observados para volumes maiores que 2%. Isto decorre da dificuldade de dispersão das fibras na pasta de cimento com a resultante formação de ouriços na matriz.

Dado os efeitos significativos da adição de fibras de aço ao concreto reciclado, é importante estabelecer expressões que permitam relacionar os teores de agregados reciclados e de fibras de aço com propriedades como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade do concreto reciclado reforçado com fibras de aço.

CAPÍTULO 5: MODELOS PARA PREVISÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CRRFA

Modelos analíticos para estimar propriedades resistentes do concreto reciclado reforçado com fibras (CRRFA) a partir de dados dos materiais que o compõem são importantes, por exemplo, para prever a resistência à compressão do CRRFA a partir de um concreto de referência com resistência X MPa, $Y\%$ teor de substituição de agregados naturais e $Z\%$ teor de fibras de aço incorporadas. Estes modelos analíticos podem dispensar a realização de ensaios para uma avaliação inicial do concreto. Neste capítulo, o modelo analítico proposto por Ramesh *et al.* (2018) para prever as resistências à tração e compressão, e módulo de elasticidade de concretos reciclados reforçados com fibras de aço é apresentado e empregado para estimar tais propriedades mecânicas de misturas de concretos avaliadas experimentalmente por outros pesquisadores.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presença do agregado reciclado e/ou fibras no concreto interfere em propriedades como resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade. Embora não haja consenso, aparentemente a fibra de aço melhora o comportamento do concreto à compressão, mas não contribui de forma expressiva para a resistência à compressão.

Com o intuito de auxiliar na previsão da influência destes componentes (fibras e teor de agregado), alguns estudos da literatura apresentam modelos de cálculo que permitem estimar algumas propriedades mecânicas do CRRFA (AHMED; ALI; ZIDAN, 2020; BAEZA *et al.*, 2018; CHOI; YUAN, 2005; GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017a; HILLES; ZIARA, 2019; KACHOUH; EL-HASSAN; EL MAADDAWY, 2019; KOUSHKBAGHI *et al.*, 2019; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018).

Foram encontrados cinco modelos para a previsão da resistência à compressão, contudo quatro deles foram descartados, pois fornecem apenas expressões que correlacionam a resistência à compressão de corpos de prova cúbicos com a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (GAO; ZHANG; NOKKEN, 2017a; KACHOUH; EL-HASSAN; EL-MAADDAWY, 2019; XIAO; LI; ZHANG, 2005; XIE, JIAN HE *et al.*, 2015).

Apenas um dos modelos da literatura permite, efetivamente, estimar a resistência à compressão do concreto reciclado reforçado com fibras; desenvolvido por Ramesh *et al.* (2018), este modelo foi adotado nas análises apresentadas neste capítulo.

Para estimar o módulo de elasticidade, foram encontrados na literatura os modelos de Gao *et al.* (2017), Kachouh *et al.* (2019) e Ramesh *et al.* (2018). Destes, os dois primeiros (apesar de serem desenvolvidos com dados de CRRFA) foram descartados porque não levam em conta as contribuições do agregado reciclado e das fibras. E, assim como no caso da resistência à compressão, apenas o modelo de Ramesh *et al.* (2018) foi utilizado neste estudo.

Quanto à resistência à tração do CRRFA, apenas o modelo de Ramesh *et al.* (2018) foi encontrado na literatura.

Baseado em resultados experimentais, o modelo de Ramesh *et al.* (2018) considera, de forma distinta, a influência do agregado reciclado e das fibras em cada propriedade do concreto, apresentando limitações que se relacionam com o teor de agregado reciclado, além do tipo e volume máximo de fibras incorporadas à mistura.

5.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ANALÍTICOS

O modelo de Ramesh *et al.* (2018) fornece expressões para estimar a resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E) e resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) para concretos produzidos com até 100% de substituição do agregado natural por agregado reciclado e reforçado com fibras de aço com ancoragem em gancho em um volume de até 1%. Para estimar a resistência à compressão é utilizada a Equação (5.1).

$$f_c = f'_c - 0,937P_{ARC}^{0,525} \quad (5.1)$$

Onde:

f'_c - resistência à compressão média do concreto de referência (agregados naturais e sem fibras de aço);

P_{ARC} - porcentagem de agregado reciclado na mistura.

Segundo os achados de Ramesh *et al.* (2018), não foi possível estabelecer correlação clara entre a concentração de fibras na mistura e a resistência à compressão do concreto. Assim, para esta propriedade, apenas a resistência à compressão do concreto de referência e a porcentagem de agregado reciclado são levados em conta.

A contribuição das fibras de aço é desconsiderada pois, segundo Ramesh *et al.* (2018), o ganho promovido pela costura das fissuras com a incorporação de fibras é parcialmente anulado pela maior concentração de vazios que surgem no concreto. Os coeficientes da Equação (5.1) foram determinados a partir dos resultados experimentais de Ramesh *et al.* (2018). Para isso, os autores tomaram como referência um concreto com 48,77MPa de resistência à compressão. Este mesmo concreto foi tomado como referência nas expressões para previsão do módulo de elasticidade e da resistência à tração.

Para o módulo de elasticidade (E), Ramesh *et al.* (2018) considera, além da resistência do concreto de referência, os efeitos da quantidade de agregado reciclado e, pelas mesmas motivações apresentadas da resistência à compressão, descarta o efeito das fibras. A referida expressão é apresentada na Equação (5.2).

$$E_c = 3705\sqrt{f'_c} - 48,5P_{ARC} \quad (5.2)$$

Onde:

f'_c - resistência à compressão média do concreto de referência (agregados naturais e sem fibras de aço);

P_{ARC} - porcentagem de agregado reciclado na mistura.

Por sua vez, para prever a resistência à tração por compressão diametral (Equação (5.3), além da resistência do concreto de referência e da quantidade de agregado reciclado, o efeito das fibras de aço ganha grande importância. Conhecidamente, a incorporação de fibras ao concreto tende a melhorar o seu comportamento à tração. Entretanto, esse efeito não é regra para todos os teores de fibra. Assim, segundo Ramesh *et al.* (2018), a resposta da resistência à tração do CRRFA é resultado da combinação de três efeitos individuais: aumento na resistência com aumento no teor de fibras, não linearidade neste aumento em razão da dificuldade de distribuição e orientação das fibras em maiores volumes de incorporação e, diminuição da resistência com aumento da substituição do agregado natural por reciclado. Por essa razão, na Equação ((5.3) a quantidade de agregado reciclado tem efeito desfavorável (parcela negativa e que reduz a resistência linearmente com o aumento na quantidade de agregado reciclado). Por

outro lado, a contribuição das fibras tem efeitos distintos: efeito positivo com aumento linear e efeito negativo e quadrático, que visa contemplar as oscilações causadas pela má orientação das fibras no concreto. Portanto, é atribuída redução linear com o incremento na taxa de ARC e variação quadrática devido à presença das fibras. A referida expressão é apresentada na Equação ((5.3).

$$f_{ct,sp} = 0,51\sqrt{f'_c} - 0,001P_{ARC} + 4,666V_f - 1,259V_f^2 \quad (5.3)$$

Onde:

f'_c - resistência à compressão média do concreto de referência (agregados naturais e sem fibras de aço);

P_{ARC} - porcentagem de agregado reciclado na mistura;

V_f - volume de fibras incorporado ao concreto.

Uma vez descrito o modelo analítico de Ramesh *et al.* (2018), as equações (5.1), (5.2) e (5.3) foram utilizadas, respectivamente, na estimativa da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração de concretos reciclados reforçados com fibras de aço.

Como critério de inclusão, foram selecionados apenas estudos que contenham até 1% o volume de fibras incorporadas como reforço do concreto que é uma limitação do modelo de Ramesh *et al.* (2018). Assim, a partir da resistência média do concreto de referência (sem adição de fibras ou substituição do agregado natural) e dos volumes de fibras e agregado reciclado na mistura, foram estimadas a resistência a compressão, à tração e módulo de elasticidade. Os valores estimados foram então comparados aos resultados experimentais extraídos de 15 documentos da literatura que forneciam os parâmetros necessários à aplicação do modelo, englobando 89 diferentes misturas de concreto. Como nem todos os documentos forneciam, necessariamente, os valores experimentais para as três propriedades resistentes de interesse (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade), os dados das 89 misturas não puderam ser aplicados aos três parâmetros da análise comparativa.

Os resultados obtidos, bem como as diferenças em relação aos valores experimentais de referência são discutidos nos itens a seguir para cada uma das propriedades mecânicas avaliadas.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 5.1 são apresentados os dados de entrada para a aplicação do modelo analítico bem como os resultados estimados de resistência à compressão, indicados pelo índice *est.* Aos resultados experimentais foi atribuído índice *exp.* A tabela também traz diferença percentual Δ entre os valores estimados e experimentais.

Tabela 5.1 – Dados de entrada, resultados estimados e valores experimentais extraídos da literatura para resistência à compressão

Documento	f'_c (MPa)	P_{arc} (%)	V_f (%)	f_c (MPa)		
				<i>est.</i>	<i>exp.</i>	Δ (%)
Nazarimoufrad et al. (2016)	49,8	50	1,00	42,5	57,3	-25,84%
	49,8	50	1,00	42,5	57,2	-25,71%
	49,8	100	1,00	39,3	64,8	-39,37%
	49,8	100	1,00	39,3	63,7	-38,33%
Afroughsabet et al. (2017)	84,7	50	0,00	77,4	80,2	-3,50%
	84,7	50	0,00	77,4	87,1	-11,14%
	84,7	100	0,00	74,2	77,4	-4,15%
	84,7	100	0,00	74,2	85,4	-13,13%
	84,7	50	1,00	77,4	89,5	-13,53%
	84,7	50	1,00	77,4	96,4	-19,72%
	84,7	100	1,00	74,2	87,0	-14,73%
	84,7	100	1,00	74,2	95,8	-22,56%
Chaboki et al. (2018)	39,9	50	0,00	32,6	35,0	-6,88%
	39,9	50	1,00	32,6	35,7	-8,70%
	39,9	100	0,00	29,4	35,0	-16,04%
	39,9	100	1,00	29,4	35,3	-16,75%
Ramesh (2018)	48,8	30	0,00	43,2	44,6	-3,11%
	48,8	30	0,30	43,2	46,4	-6,87%
	48,8	30	0,50	43,2	40,0	8,03%
	48,8	30	0,70	43,2	44,4	-2,67%
	48,8	30	1,00	43,2	41,7	3,63%
	48,8	50	0,00	41,5	38,8	6,94%
	48,8	50	0,30	41,5	42,3	-1,91%
	48,8	50	0,50	41,5	44,0	-5,70%
	48,8	50	0,70	41,5	43,1	-3,73%
	48,8	50	1,00	41,5	34,8	19,23%
	48,8	70	0,00	40,1	40,0	0,21%
	48,8	70	0,30	40,1	41,8	-4,11%
	48,8	70	0,50	40,1	43,7	-8,28%
	48,8	70	0,70	40,1	43,4	-7,65%
	48,8	70	1,00	40,1	35,5	12,91%
	48,8	100	0,00	38,3	33,6	13,95%
	48,8	100	0,30	38,3	40,3	-5,00%
	48,8	100	0,50	38,3	42,5	-9,91%
48,8	100	0,70	38,3	41,9	-8,62%	
48,8	100	1,00	38,3	31,7	20,78%	

Tabela 5.1 – Dados de entrada, resultados estimados e valores experimentais extraídos da literatura para resistência à compressão (continuação)

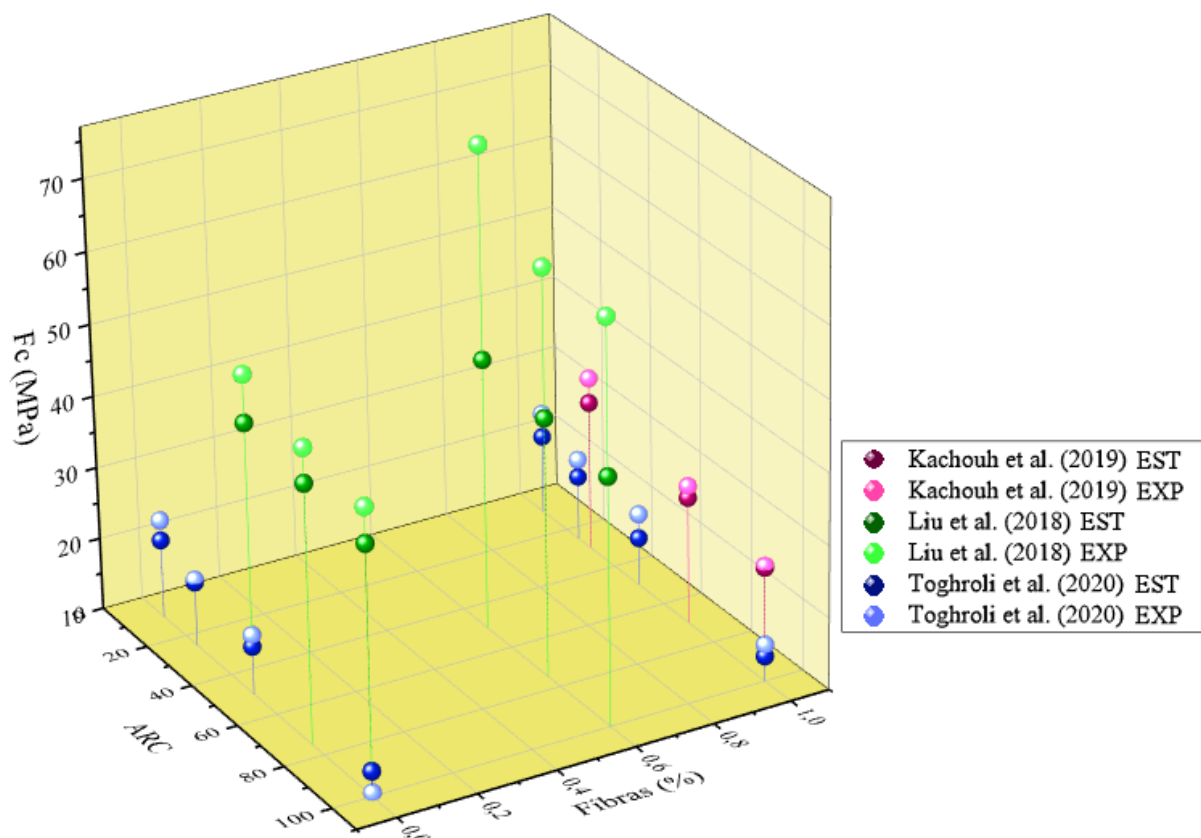
Documento	f'_c (MPa)	P_{arc} (%)	V_f (%)	f_c (MPa)		
				<i>est.</i>	<i>exp.</i>	Δ (%)
Xiao et al. (2018)	39,9	50	0,00	32,6	33,3	-1,97%
	39,9	50	0,50	32,6	39,0	-16,32%
	39,9	50	1,00	32,6	36,1	-9,71%
	39,9	100	0,00	29,4	28,5	3,11%
	39,9	100	0,50	29,4	31,4	-6,26%
	39,9	100	1,00	29,4	32,3	-9,02%
Xie et al (2018)	45,7	100	1,00	35,2	36,1	-2,58%
Chaboki et al. (2019)	37,4	50	0,00	30,1	35,0	-14,02%
	37,4	50	1,00	30,1	35,7	-15,70%
	37,4	100	0,00	26,9	36,1	-25,52%
	37,4	100	1,00	26,9	35,7	-24,69%
Kachouh et al. (2019)	36,4	30	1,00	30,8	34,3	-10,17%
	36,4	70	1,00	27,7	29,3	-5,52%
	36,4	100	1,00	25,9	26,1	-0,82%
Meesala et al. (2019)	32,14	50	0,00	24,8	28,6	-13,05%
	32,14	50	0,75	24,8	40,1	-38,13%
Liu et al. (2020)	54,9	50	0,00	47,6	54,2	-12,19%
	54,9	50	0,60	47,6	76,8	-38,03%
	54,9	75	0,00	45,9	50,7	-9,55%
	54,9	75	0,60	45,9	66,3	-30,83%
	54,9	100	0,00	44,4	49,3	-9,97%
	54,9	100	0,60	44,4	65,8	-32,54%
Su (2020)	45,6	40	0,00	39,1	44,6	-12,33%
	45,6	40	0,50	39,1	45,4	-13,87%
	45,6	40	1,00	39,1	47,8	-18,20%
	45,6	70	0,00	36,9	40,6	-9,16%
	45,6	70	0,50	36,9	42,2	-12,60%
	45,6	70	1,00	36,9	45,8	-19,47%
	45,6	100	0,00	35,1	39,8	-11,84%
	45,6	100	0,50	35,1	40,5	-13,37%
	45,6	100	1,00	35,1	42,6	-17,64%
Toghroli et al. (2020)	24,0	10	0,00	20,9	23,7	-11,98%
	24,0	10	1,00	20,9	24,2	-13,80%
	24,0	25	0,00	18,9	19,3	-1,96%
	24,0	25	1,00	18,9	21,4	-11,58%
	24,0	50	0,00	16,7	18,3	-8,78%
	24,0	50	1,00	16,7	20,1	-16,95%
	24,0	100	0,00	13,5	10,5	28,44%
	24,0	100	1,00	13,5	15,1	-10,68%
Ali et al. (2021)	57,4	100	0,00	46,9	46,8	0,19%
	57,4	100	0,50	46,9	47,6	-1,50%
	57,4	100	1,00	46,9	48,6	-3,53%

Tabela 5.1 – Dados de entrada, resultados estimados e valores experimentais extraídos da literatura para resistência à compressão (continuação)

Documento	f'_c (MPa)	P_{arc} (%)	V_f (%)	f_c (MPa)		
				<i>est.</i>	<i>exp.</i>	Δ (%)
Gao et al. (2021)	42,6	30	1,00	37,0	44,3	-16,36%
	42,6	50	0,00	35,3	40,7	-13,30%
	42,6	50	0,50	35,3	42,1	-16,13%
	42,6	50	1,00	35,3	43,4	-18,75%
	42,6	100	1,00	32,1	41,4	-22,55%
Wang et al. (2021)	29,5	50	0,00	22,2	27,1	-18,10%
	29,5	50	0,60	22,2	28,6	-22,40%
	29,5	50	0,90	22,2	32,6	-31,92%
	29,5	100	0,00	19,0	25,8	-26,41%
	29,5	100	0,60	19,0	26,6	-28,62%
	29,5	100	0,90	19,0	29,8	-36,29%

Com base nos resultados da Tabela 5.1, na análise comparativa entre valores de resistência à compressão estimados e experimentais foi verificado que o modelo de Ramesh *et al.* (2018) é conservador Figura 5.1.

Figura 5.1- Resistência à compressão: valores estimados e experimentais para concretos reciclados reforçados com fibras de aço



Neste sentido, é interessante destacar como variações na resistência à compressão do concreto de referência (f'_c) e porcentagem de agregado reciclado (P_{ar}) interferem na acurácia dos resultados calculados em relação aos valores experimentais. Na Tabela 5.2 são apresentadas média, mediana e desvio padrão da diferença percentual entre os valores previstos de resistência à compressão do CRRFA. Os dados foram organizados por faixas de resistência do concreto de referência (até 40MPa; entre 40MPa e 50MPa e superior a 50MPa), quantidade de agregado reciclado (0 a 50%; 50 a 100%) e volume de fibras (0; até 0,5%, entre 0,5 e 1%).

Tabela 5.2 – Resistência à compressão: parâmetros estatísticos para erro do modelo em função da faixa de resistência, quantidade de agregado reciclado e volume de fibras

f_c (MPa)	M_e	M_d	S	Agregado Reciclado (%)	M_e	M_d	S	V_f (%)	M_e	M_d	S
≤ 40	-10,50%	-10,68%	11,44%	0-50	-12,48%	-11,78%	8,17%	0	-8,38%	-8,78%	5,02%
								$\leq 0,5$	-16,32%	-	-
								0,5-1,0	-16,37%	-13,80%	10,06%
								0	-2,50%	-6,46%	23,82%
								$\leq 0,5$	-6,26%	-	-
								0,5-1,0	-10,15%	-9,02%	8,96%
40-50	-6,84%	-5,70%	15,00%	0-50	-6,39%	-4,71%	12,49%	0	-3,16%	-3,11%	10,12%
								$\leq 0,5$	-4,51%	-5,70%	8,75%
								0,5-1,0	-7,69%	-3,73%	16,69%
								0	7,08%	7,08%	9,72%
								$\leq 0,5$	-6,82%	-6,64%	2,73%
								0,5-1,0	-11,83%	-8,62%	23,38%
> 50	-14,14%	-12,19%	11,27%	0-50	-16,35%	-12,86%	11,82%	0	-8,94%	-11,14%	4,74%
								$\leq 0,5$	-	-	-
								0,5-1,0	-23,76%	-19,72%	12,74%
								0	-7,32%	-9,55%	5,29%
								$\leq 0,5$	-1,50%	-	-
								0,5-1,0	-20,84%	-22,56%	12,01%

Os itens marcados com “-“ representam casos em que não havia dados suficientes para calcular a respectiva propriedade estatística naquele intervalo.

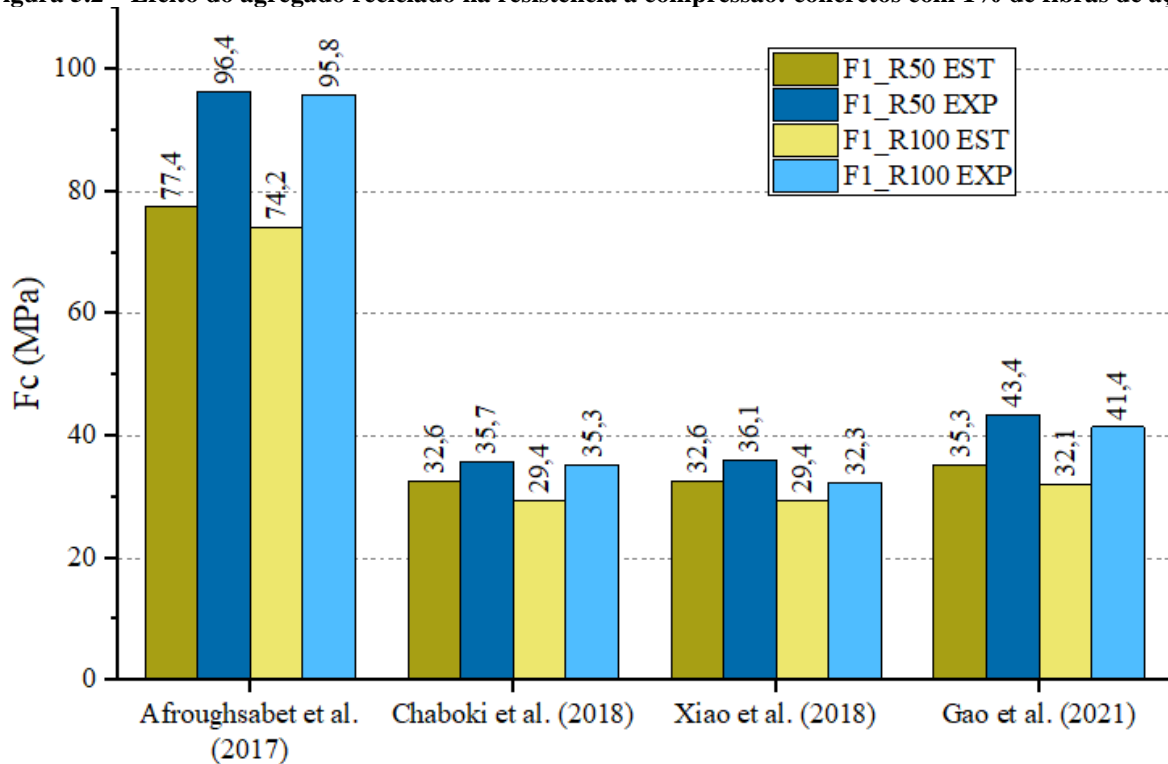
Para os concretos de referência com resistência entre 40 e 50 MPa foi registrada a melhor correlação entre valores teóricos e experimentais; os valores previstos ficaram, 6,84% abaixo dos valores experimentais. Para os demais grupos (resistência inferior a 40 MPa ou superior a 50 MPa), os valores previstos também foram inferiores aos experimentais, mas as diferenças médias foram maiores, 10,50% e 14,14%, respectivamente. Para os concretos com $f'_c \leq 40$ MPa, a mediana, que assim como a média, representa uma medida de tendência central para um conjunto de dados desconsiderando valores extremos, tem valor praticamente idêntico à média, indicando uniformidade dos resultados nesse grupo de resistência. Nos demais grupos a mediana foi aproximadamente 15% menor que a média, o que sugere a ocorrência de valores menos uniformes. O desvio padrão dos resultados de cada faixa de resistência variou entre 11,27% e 15,00%, indicando que as médias das diferenças entre valores previstos e experimentais são representativas do conjunto.

Se forem consideradas, além da faixa de resistência, as diferentes faixas de substituição do agregado e reforço com fibras de aço, os valores (Tabela 5.2) de resistência à compressão do CRRFA que mais se aproximaram dos valores experimentais correspondem a concretos com resistências entre 40 e 50 MPa e até 50% de agregado reciclado, apresentando boa acurácia. A diferença média varia entre 3,16% e 7,69% e independe do volume de fibras de aço. A boa aderência dos valores previstos para os concretos dessa faixa de resistência do concreto de referência ocorreu porque os dados utilizados para desenvolvimento do modelo de Ramesh *et al.* (2018) eram oriundos de um concreto com resistência dentro desse intervalo (48,77 MPa).

Outros importantes aspectos puderam ser observados. A redução da resistência à compressão do concreto devido ao agregado reciclado já era esperada e foi reportada em diversos documentos (AFROUGH SABET; BIOLZI; OZBAKKALOGLU, 2017; CHABOKI *et al.*, 2018; GAO *et al.*, 2021; LIU, ZHENZHEN *et al.*, 2020; TOGHROLI *et al.*, 2020). Por essa razão, o efeito do agregado reciclado é levado em conta no modelo analítico (Equação (5.1) por meio da parcela negativa da expressão, que estabelece relação direta entre resistência do concreto reciclado e teor de substituição.

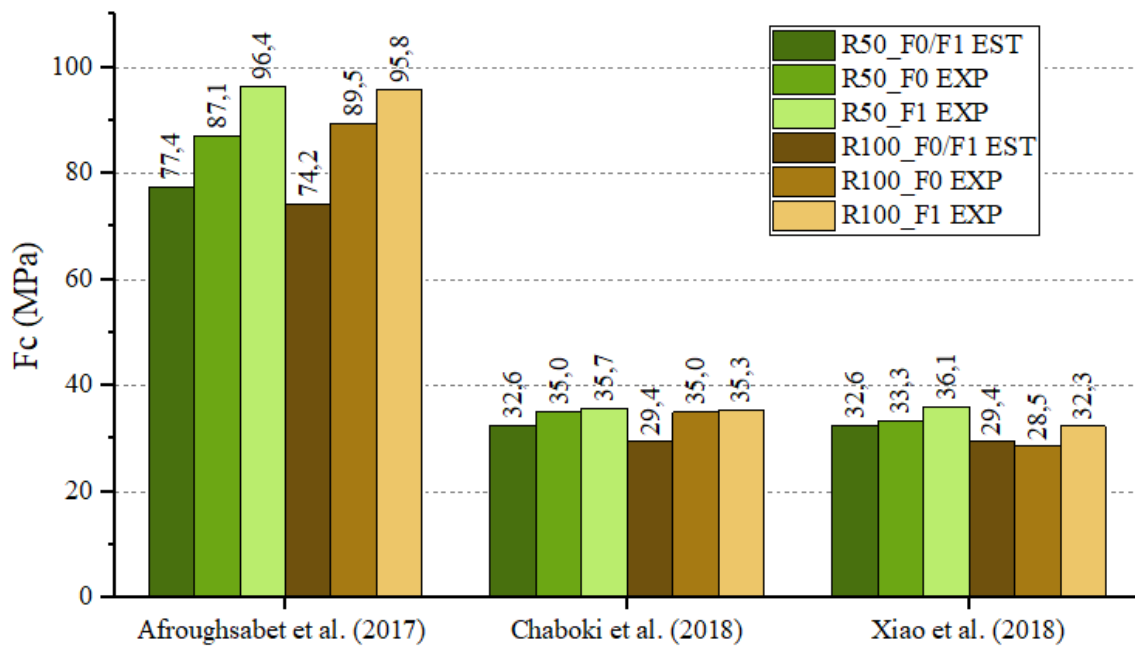
Ao aplicar o modelo aos dados disponíveis em diversos documentos e comparar os valores previstos a resultados experimentais, verifica-se que a expressão subestima a resistência do concreto. Contudo, a expressão consegue representar a tendência de queda de resistência a compressão associada ao teor de substituição, apontada pela literatura. Essa resposta pode ser observada na Figura 5.2, para concretos reciclados com 1% de fibras.

Figura 5.2 – Efeito do agregado reciclado na resistência a compressão: concretos com 1% de fibras de aço



O modelo analítico de Ramesh *et al.* (2018) não leva em conta o teor de fibras para estimar a resistência à compressão do concreto reciclado. Contudo, ao desconsiderar a contribuição das fibras para a resistência à compressão sob a premissa de que os vazios provocados pela sua presença anulariam o ganho de resistência conferido pelo “efeito ponte”, a resistência à compressão do concreto é subestimada. Por isso, ao aplicar o modelo analítico a dois concretos com mesmo teor de substituição do agregado reciclado, sendo um sem fibras e o outro com 1% de fibras de aço, as resistências previstas são idênticas. Desse modo, como pode ser observado na Figura 5.3, considerando que os resultados experimentais indicam aumento de resistência à compressão do concreto com a incorporação de fibras, para um concreto com teor de agregado reciclado constante, as diferenças entre as resistências previstas e experimentais aumentam com o aumento no volume de fibras.

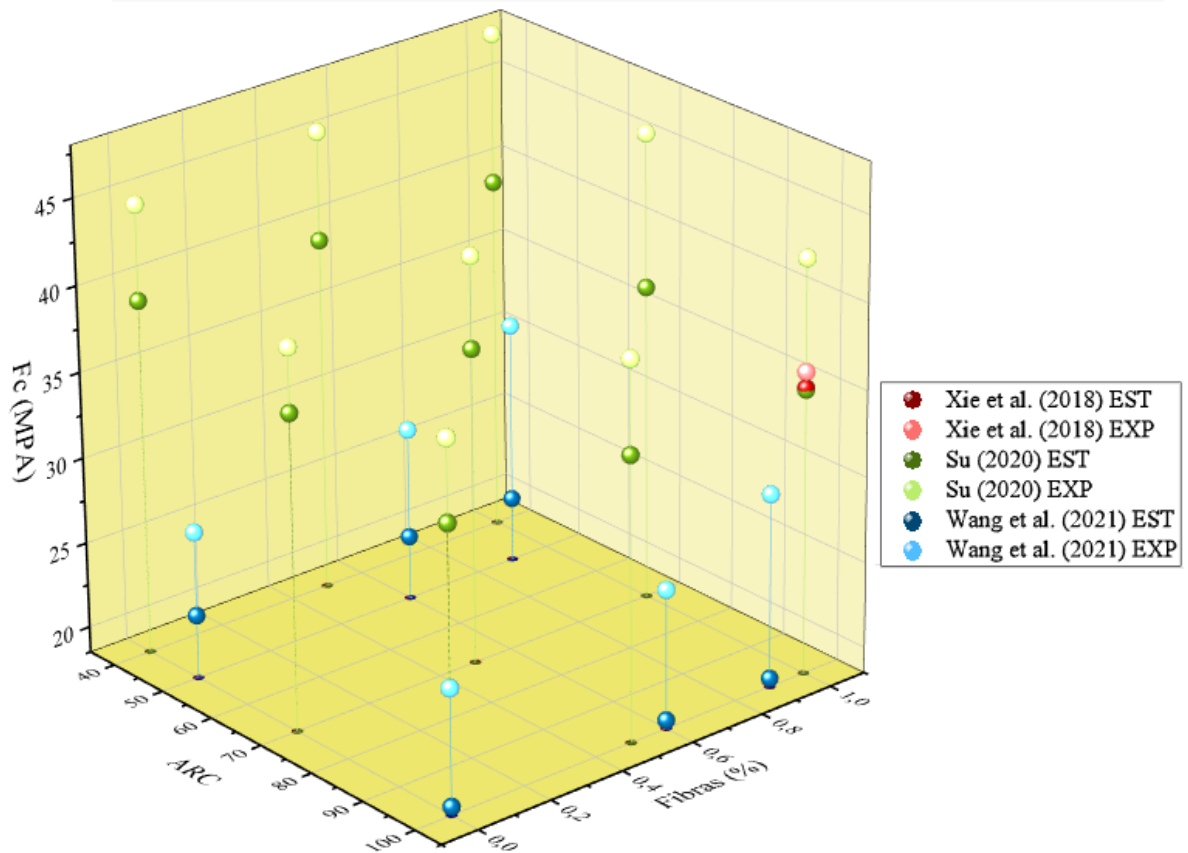
Figura 5.3 – Efeito das fibras na diferença entre resistências estimadas e experimentais para concretos com 50% e 100% de agregado reciclado



Apesar do modelo analítico se basear em concretos reforçados com fibras de aço com gancho, as mesmas tendências de variação na resistência à compressão estimadas em relação a resistência experimental se replicam para concretos reforçados com outros tipos de fibra de aço (lisa ou corrugadas).

Em concretos com mesmo volume de fibras, o aumento do teor de substituição do agregado causa redução na resistência à compressão estimada (Figura 5.4); isso corrobora o comportamento observado nos resultados experimentais. Como a expressão para estimar a resistência à compressão não leva em conta (neste caso) a variação do volume de fibras, se o teor de agregado reciclado for mantido constante, os valores de resistência previstos não sofrerão variação. Por outro lado, os resultados experimentais mostram aumento da resistência com aumento de teor de fibras.

Figura 5.4 - Resistência à compressão: valores estimados e experimentais para concretos reciclados reforçados com fibras de aço lisa e corrugada



Desse modo, a comparação entre valores de resistência à compressão experimentais e estimados sugere que a precisão do modelo analítico diminui com o aumento do volume de fibras. Considerando a diferença percentual entre os valores estimados em relação aos experimentais sugere que o modelo pode ser aplicado à estimativa da resistência à compressão do CRRFA com boa aproximação para todas as possíveis combinações de faixa de resistência do concreto de referência, quantidade de agregado reciclado e teor de fibras avaliados neste documento.

5.4 PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

A análise comparativa entre os valores de módulo de elasticidade (E) estimado e experimentais ficou restrita a um pequeno conjunto de dados. Isso ocorreu, pois, dentre os documentos considerados na revisão, apenas três (totalizando 9 misturas) forneciam os valores de módulo de elasticidade e os dados necessários à aplicação do modelo analítico.

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores estimados e experimentais do módulo de elasticidade; estes são indicados, respectivamente, pelos índices *est.* e *exp.* As diferenças percentuais entre valores estimados e experimentais são indicadas pelo parâmetro Δ .

Tabela 5.3 - Dados de entrada, resultados estimados e valores experimentais extraídos da literatura para módulo de elasticidade

Documento	f'_c (MPa)	P_{arc} (%)	V_f (%)	E (GPa)		
				<i>est.</i>	<i>exp.</i>	Δ (%)
Xie <i>et al.</i> (2018)	45,7	100	1,00	20,2	37,2	-45,75%
Xiao <i>et al.</i> (2019)	39,9	50	0,00	21,0	29,6	-29,13%
	39,9	50	0,50	21,0	32,0	-34,44%
	39,9	50	1,00	21,0	30,5	-31,22%
	39,9	100	0,00	18,6	27,4	-32,29%
	39,9	100	0,50	18,6	23,2	-20,03%
	39,9	100	1,00	18,6	24,7	-24,89%
Meesala (2019)	32,14	50	0,00	18,6	24,3	-23,54%
	32,14	50	0,75	18,6	32,1	-42,12%

Com base nesse restrito conjunto de dados, os resultados experimentais apontam que quanto maior o teor de agregado reciclado, menor o módulo de elasticidade do concreto reciclado. Para concretos com reforço de fibras a resposta à incorporação de fibras não é linear. A depender da homogeneização do reforço na pasta cimentícia pode ocorrer tanto aumento quanto redução no módulo de elasticidade (ASLANI *et al.*, 2019; MEESALA, 2019; QURESHI; ALI; ALI, 2020; RAMESH; MIRZA; KANG, 2018; XIAO *et al.*, 2019).

Em razão da quantidade restrita de dados para aplicação do modelo analítico, a análise estatística do erro entre os valores estimados e experimentais não levou em conta a faixa de resistência do concreto de referência. Assim sendo, os resultados foram avaliados apenas quanto à quantidade de agregado e fibras na mistura (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Módulo de elasticidade: parâmetros estatísticos para erro do modelo em função da quantidade de agregado reciclado e volume de fibras

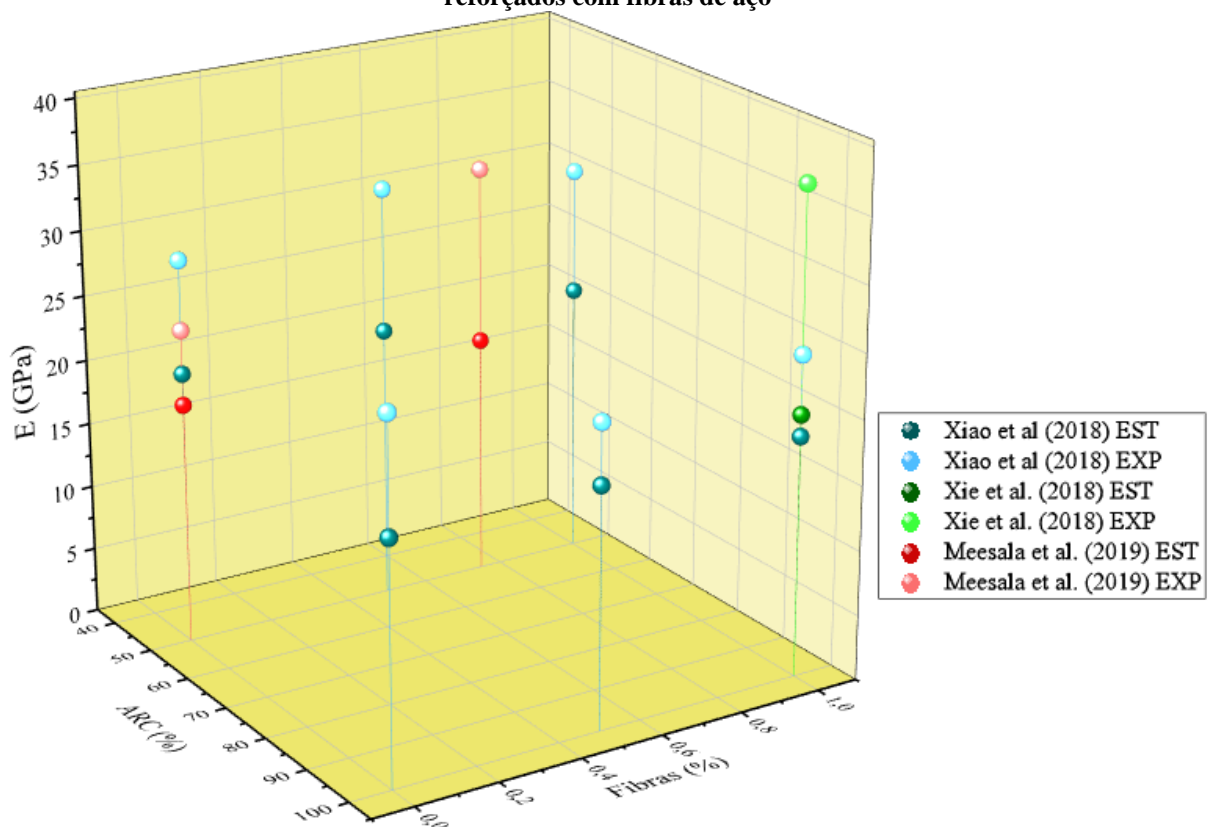
Agregado Reciclado (%)	Me	Md	S	V_f (%)	Me	Md	S
0-50	-32,09%	-31,22%	6,87%	0	-26,33%	-	-
				$\leq 0,5$	-34,44%	-	-
				0,5-1,0	-36,67%	-	-
50-100	-30,74%	-28,59%	11,21%	0	-32,29%	-	-
				$\leq 0,5$	-20,03%	-	-
				0,5-1,0	-35,32%	-	-

Os itens marcados com “-” correspondem aos casos em que não havia dados suficientes para calcular a respectiva propriedade estatística naquele intervalo.

Independentemente da quantidade de agregado reciclado, o modelo sugere módulo de elasticidade em torno de 30% inferior ao valor experimental. Considerando que a mediana é extremamente próxima à média, o conjunto de dados aparenta não possuir valores discrepantes. O desvio padrão (inferior a 15%) indica boa representatividade dos dados. Quanto à influência da variação do teor de fibras, o modelo subestima de 20 a 35% o módulo de elasticidade do concreto.

Tal qual ocorreu para a resistência à compressão, o modelo para previsão do módulo de elasticidade do concreto reciclado reforçado com fibras não leva em conta a contribuição das fibras. Isto faz com que, ao contrário dos valores experimentais, ao manter a taxa de agregado reciclado constante e variar o volume de fibras, os valores estimados pelo modelo não se alterem. Com isso, conforme Figura 5.5, os valores de módulo de elasticidade previstos subestimam o valor experimental e, apesar de fornecerem uma estimativa a favor da segurança, o erro cresce consideravelmente com o aumento do teor de fibras.

Figura 5.5 – Módulo de elasticidade: valores estimados e experimentais para concretos reciclados reforçados com fibras de aço



Em síntese, apesar do conjunto de dados ser pequeno, as tendências de comportamento do módulo de elasticidade, previsto via modelo analítico, foram similares nas 9 misturas de

concreto avaliadas. De maneira geral, os valores previstos subestimam os resultados experimentais, sugerindo uma estimativa em torno de 30% inferior, independentemente do teor de substituição do agregado natural por reciclado. Na maioria dos casos, o aumento no teor de fibras incorporadas promoveu um aumento no erro percentual entre os resultados modelados e experimentais.

Considerando a escassez de documentos disponíveis na literatura que fornecessem os parâmetros de entrada necessários para estimativa do módulo de elasticidade do CRRFA, a baixa amostragem encontrada impede que maiores conclusões sobre a viabilidade de aplicação do modelo na previsão do módulo de elasticidade sejam feitas. Ainda que o banco de dados avaliado indique que o modelo não é adequado (independente da faixa de resistência, quantidade de agregado reciclado ou teor de fibras), é pertinente a realização de mais estudos que investiguem a aplicação do mesmo na estimativa dessa propriedade do CRRFA.

5.5 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A redução da resistência à tração do concreto devido ao agregado reciclado foi reportada por diversos autores (AFROUGHSAKET *et al.*, 2017; CHABOKI *et al.*, 2019; MEESALA, 2019; RAMESH *et al.*, 2018; SU, 2020; TOGHROLI *et al.*, 2020). Na Tabela 5.5 são apresentados os dados de entrada, os valores previstos e experimentais bem como o erro percentual (Δ).

Tabela 5.5 - Dados de entrada, resultados estimados e valores experimentais extraídos da literatura para resistência à tração

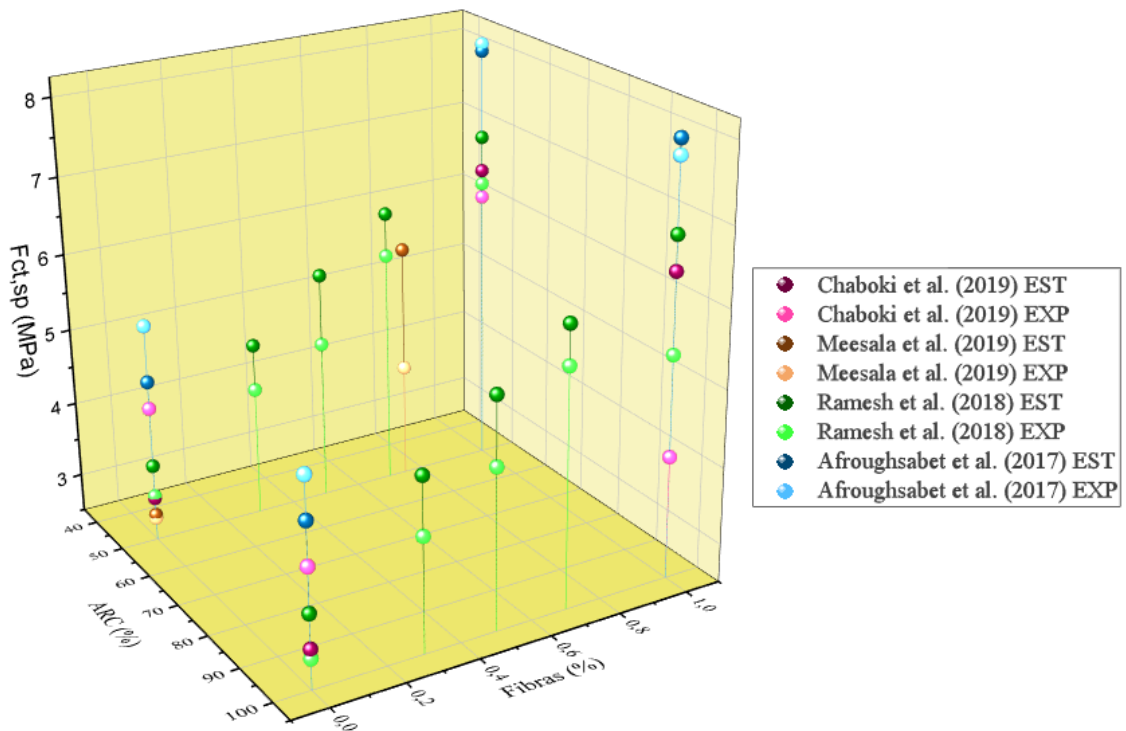
Documento	f'_c (MPa)	P_{arc} (%)	V_f (%)	$f_{ct,sp}$ (MPa)		
				est.	exp.	Δ (%)
Nazarimoufrad et al. (2016)	49,8	50	1,00	7,0	7,2	-3,65%
	49,8	50	1,00	7,0	7,3	-4,94%
	49,8	100	1,00	6,9	7,6	-9,76%
	49,8	100	1,00	6,9	7,5	-8,89%
Afroughsabet et al. (2017)	84,7	50	0,00	4,6	4,9	-5,09%
	84,7	50	0,00	4,6	5,4	-15,86%
	84,7	100	0,00	4,6	4,5	1,82%
	84,7	100	0,00	4,6	5,1	-11,89%
	84,7	50	1,00	8,1	7,0	12,80%
	84,7	50	1,00	8,1	8,1	-1,11%
	84,7	100	1,00	8,0	7,0	13,13%
	84,7	100	1,00	8,0	7,8	2,51%
Chaboki et al. (2018)	39,9	50	0,00	3,2	4,3	-34,32%
	39,9	50	1,00	6,6	5,9	10,01%
	39,9	100	0,00	3,1	4,0	-29,43%
	39,9	100	1,00	6,5	4,1	37,20%

Tabela 5.5 - Dados de entrada, resultados estimados e valores experimentais extraídos da literatura para resistência à tração (continuação)

Documento	f'_c (MPa)	P_{arc} (%)	V_f (%)	$F_{ct,sp}$ (MPa)		
				<i>est.</i>	<i>exp.</i>	Δ (%)
Chaboki et al. (2019)	37,4	50	0,00	3,1	4,3	-39,79%
	37,4	50	1,00	6,5	6,1	5,50%
	37,4	100	0,00	3,0	4,0	-33,82%
	37,4	100	1,00	6,4	4,1	36,20%
Meesala et al. (2019)	32,14	50	0,00	2,8	2,8	1,45%
	32,14	50	0,75	5,6	4,0	28,98%
Su 2020	45,6	40	0,00	3,4	2,7	20,09%
	45,6	40	0,50	5,4	3,2	41,72%
	45,6	40	1,00	6,8	3,5	49,35%
	45,6	70	0,00	3,4	2,5	25,31%
	45,6	70	0,50	5,4	2,9	45,85%
	45,6	70	1,00	6,8	3,2	52,51%
	45,6	100	0,00	3,3	2,2	33,61%
	45,6	100	0,50	5,4	2,7	49,83%
Toghroli et al. (2020)	45,6	100	1,00	6,8	3,1	54,38%
	24	10	0,00	2,5	2,3	7,17%
	24	10	1,00	5,9	2,7	54,37%
	24	25	0,00	2,5	2,0	18,33%
	24	25	1,00	5,9	2,5	56,81%
	24	50	0,00	2,4	1,7	28,94%
	24	50	1,00	5,9	2,0	65,84%
	24	100	0,00	2,4	0,9	62,48%
Ali et al. (2021)	24	100	1,00	5,8	1,1	81,05%
	57,4	100	0,00	3,8	3,6	4,35%
	57,4	100	0,50	5,8	4,3	25,63%
Gao et al. (2021)	57,4	100	1,00	7,2	4,5	37,25%
	42,6	30	1,00	6,7	6,6	1,28%
	42,6	50	0,00	3,3	4,2	-26,88%
	42,6	50	0,50	5,3	6,8	-28,75%
	42,6	50	1,00	6,7	6,9	-3,50%
	42,6	100	1,00	6,6	6,2	6,72%

No caso da resistência à compressão, não há influência claramente estabelecida entre esta propriedade e a incorporação de fibras. Por outro lado, há consenso que a presença de fibras de aço aumenta a resistência à tração do concreto. Dessa forma, o modelo proposto por Ramesh et al. (2018), Equação (5.3) leva em conta, além do percentual de agregado reciclado, a contribuição das fibras de aço. Diferentemente das propriedades mecânicas avaliadas anteriormente (resistência à compressão e módulo de elasticidade), no caso da resistência à tração os valores estimados tendem a superestimar os valores experimentais (Figura 5.6).

Figura 5.6 – Resistência à tração: valores estimados e experimentais para concretos reciclados reforçados com fibras de aço



Na Tabela 5.6 são apresentadas média, mediana e desvio padrão da diferença percentual entre os valores de resistência à tração estimados e experimentais do CRRFA, agrupados por faixa de resistência do concreto de referência, quantidade de agregado reciclado e volume de fibras na mistura.

Tabela 5.6 – Parâmetros estatísticos para erro do modelo na estimativa da resistência à tração em função da faixa de resistência, teor de agregado reciclado e volume de fibras

$f'c$ (MPa)	M_e	M_d	S	Agregado Reciclado (%)	M_e	M_d	S	V_f (%)	M_e	M_d	S
≤40	65,65%	31,58%	112,50%	0-50	43,30%	16,79%	68,54%	0	3,06%	4,60%	26,95%
								≤0,5	-	-	-
								0,5-1,0	83,53%	79,99%	75,65%
								0	39,50%	-22,74%	109,99%
								≤0,5	-	-	-
								0,5-1,0	181,24%	59,23%	213,50%
40-50	34,93%	16,17%	49,50%	0-50	15,59%	-3,39%	41,92%	0	1,98%	1,98%	32,76%
								≤0,5	24,63%	24,63%	66,41%
								0,5-1,0	17,42%	-3,39%	44,78%
								0	33,89%	-	-
								≤0,5	92,00%	-	10,38%
								0,5-1,0	43,98%	7,20%	65,11%
>50	9,30%	2,57%	21,35%	0-50	-1,24%	-2,97%	11,85%	0	-9,26%	-9,26%	6,25%
								≤0,5	-	-	-
								0,5-1,0	6,79%	6,79%	11,16%
								0	4,55%	-	-
								≤0,5	34,47%	-	-
								0,5-1,0	25,68%	15,12%	29,83%

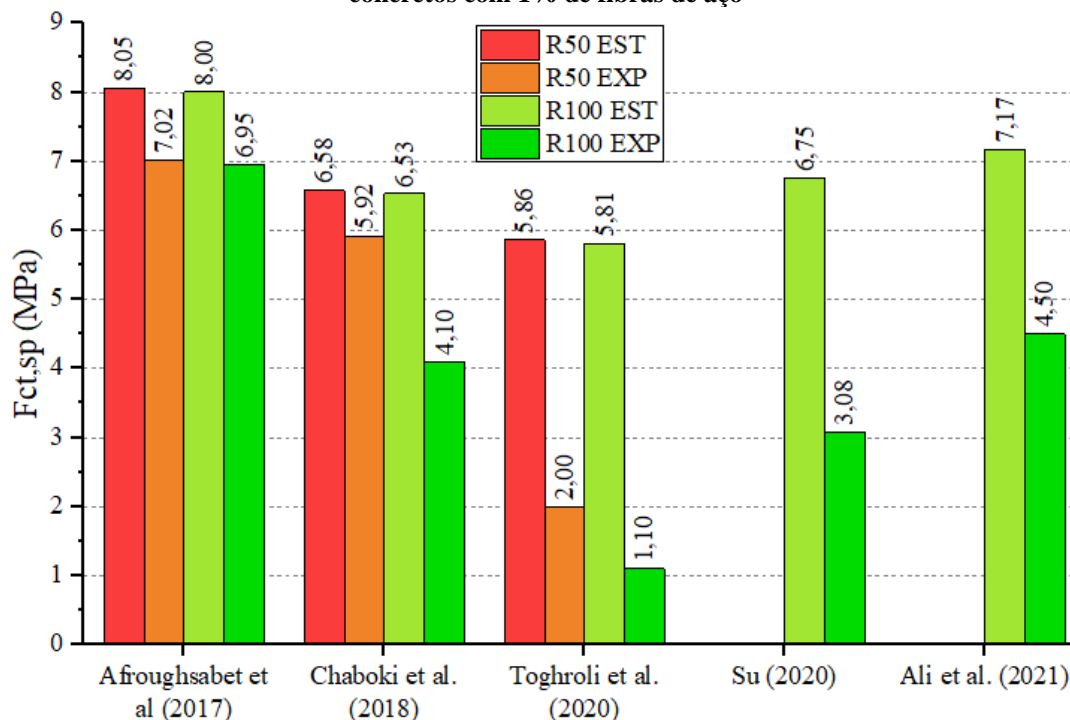
Os itens marcados com “-“ representam os casos em que não havia dados suficientes para calcular a respectiva propriedade estatística naquele intervalo.

Assim como ocorreu para resistência à compressão e módulo de elasticidade, a expressão para estimar a resistência à tração foi obtida a partir de um concreto de referência com resistência à compressão média (f'_c) igual a 48,8 MPa. Conseqüentemente, era de se esperar que para resistências à compressão nesta faixa ocorreria a melhor acurácia, o que não ocorreu. Ao aplicar o modelo concretos com resistências entre 40MPa e 50MPa os resultados obtidos superestimaram, em média, em 34,93% os valores experimentais. Por sua vez, a mediana (que é menos afetada pelos valores extremos da análise) indicou diferença de 16,17%, consideravelmente menor que o valor médio, o que sugere baixa uniformidade entre os resultados.

Para resistências inferiores a 40MPa ou superiores a 50MPa, os valores médios previstos foram, respectivamente 65,65% e 9,30% maiores que os experimentais. A maior precisão verificada para concretos com resistências superiores a 50MPa deve ser avaliada com cautela, considerando que é aferida com base em um menor conjunto de dados disponível para essa faixa de resistência (11 misturas de concreto). Por outro lado, concretos com resistência menor que C40 ou entre C40 e C50 tiveram sua precisão avaliada para um conjunto maior de dados (18 e 38 misturas, respectivamente). Dessa forma, ainda que indiquem menor precisão, para misturas com resistências entre 40 e 50MPa os resultados são mais confiáveis.

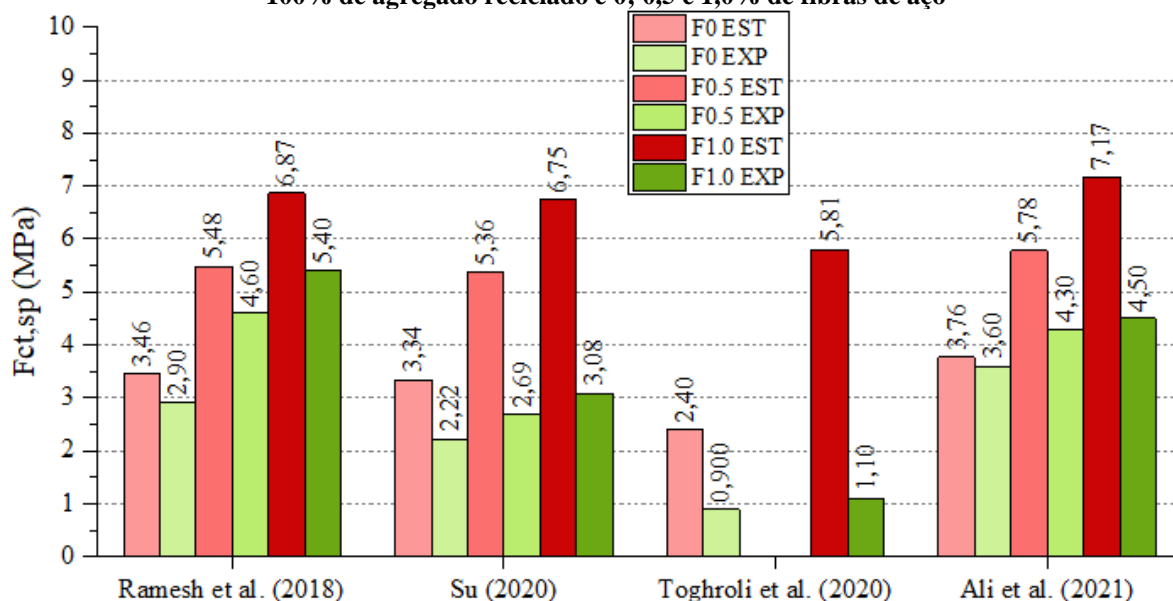
Conforme esperado, considerando que a maior porosidade do agregado reciclado afeta, além da resistência à compressão do concreto, outras propriedades do concreto, o modelo analítico para prever a resistência à tração apresenta a mesma tendência de redução observada para os valores experimentais. Entretanto, conforme apresentado na Tabela 5.1 os valores previstos são consideravelmente superiores aos experimentais, principalmente quando há substituição total do agregado natural pelo reciclado. Analisando apenas os concretos com 50% de agregado reciclado, independente da faixa de resistência ou volume de fibras incorporadas, a resistência à tração prevista foi, em média, 11,21% superior à resistência experimental. Para concretos com 100% de agregado reciclado essa diferença aumentou para 44,97% (Tabela 5.3). Dessa forma, conclui-se que o reflexo efetivo da presença do agregado reciclado na resistência à tração do concreto é maior do que a prevista pelo modelo analítico. Na Figura 5.7, considerando apenas concretos com 1% de fibras de aço o aumento na diferença entre valores previstos e experimentais é notório quando o percentual de agregado reciclado passa de 50% para 100%.

Figura 5.7 - Variação na resistência à tração em função da quantidade de agregado reciclado para concretos com 1% de fibras de aço



Na maioria dos casos avaliados, a influência das fibras como reforço no concreto é superestimada pelo modelo. Separando-se as misturas com volume de fibras entre 0 e 1%, independentemente da faixa de resistência do concreto de referência ou teor de agregado reciclado, a diferença média entre valores estimados e experimentais aumentava com o incremento no teor de fibras. Para concretos sem fibras, a resistência à tração prevista foi, em média, 11,76% superior aos valores experimentais, enquanto para concretos com 0,5% e 1% as diferenças foram maiores (53,54% e 60,95%, respectivamente). Os resultados estimados indicam que a contribuição das fibras de aço na resistência à tração do concreto é superestimada e, apesar do aumento do teor de fibras aumentar a resistência à tração, o modelo analítico não consegue representar, adequadamente, o aumento observado experimentalmente. Essa resposta fica clara na Figura 5.8, onde os resultados previstos são comparados aos experimentais, considerando concretos com 100% de agregado reciclado e 0; 0,5 e 1,0% de fibras de aço.

Figura 5.8 – Diferença entre valores previstos e experimentais de resistência à tração em concretos com 100% de agregado reciclado e 0; 0,5 e 1,0% de fibras de aço



5.6 COMENTÁRIOS FINAIS

O modelo de cálculo proposto por Ramesh *et al.* (2018) que fornece expressões para prever resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração do concreto reciclado reforçado com fibras de aço (CRRFA) foi avaliado. As expressões de Ramesh *et al.* (2018) tomam a resistência do concreto de referência como dado de entrada e, a partir dela, são estimadas as propriedades mecânicas do (CRRFA).

Valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração experimentais disponíveis na literatura foram comparados aos previstos utilizando o modelo de Ramesh *et al.* (2018).

Em resumo, dentre as três propriedades mecânicas avaliadas, a resistência à compressão do CRRFA foi a que retornou resultados mais próximos dos valores experimentais, com diferenças médias estimado-experimental entre 6,84 e 14,14%. As melhores correlações foram observadas para concretos com resistência entre 40 e 50MPa. Isto ocorreu porque o modelo analítico foi desenvolvido a partir de concretos dessa faixa de resistência (48,8MPa). Apesar do modelo não levar em conta a contribuição das fibras para a resistência à compressão, os resultados experimentais indicam aumento de resistência devido à adição de até 1% de fibras. Ainda assim, independentemente da classe de resistência e quantidade de agregados reciclados, para misturas com até 1% de fibras de aço, os valores estimados para resistência à compressão indicam que o modelo pode ser empregado e retorna resultados com boa precisão.

Dessa forma, para melhorar a precisão das estimativas, os resultados sugerem que modelo analítico deveria considerar a contribuição das fibras para a resistência à compressão. A mesma tendência de estimativa inferior aos valores experimentais foi observada para o módulo de elasticidade do material.

Quanto à expressão para prever a resistência à tração, as diferenças entre os valores previstos e experimentais foram substancialmente maiores. Neste caso, além dos efeitos do agregado reciclado, o modelo também considera a contribuição das fibras. De fato, o incremento no volume de fibras ocasiona um aumento considerável nos valores experimentais de resistência à tração, entretanto, o modelo analítico superestima este efeito fazendo com que os valores previstos sejam, em alguns casos, muito superiores aos experimentais. Contudo, para concretos cuja resistência do concreto de referência está entre 40 e 50 MPa e contendo até 50% de agregado reciclado, a diferença entre os valores previsto e experimentais variou entre 1,98 e 24,63%, sugerindo que, dentro dessas características, o modelo pode ser empregado.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Este capítulo contém as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar os principais achados disponíveis na literatura sobre o comportamento do Concreto Reciclado Reforçado com Fibras de Aço (CRRFA), abordando suas características em estado fresco e endurecido, com destaque para as principais propriedades resistentes do concreto: resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração.

Adicionalmente, na revisão sistemática foi identificado um modelo analítico para previsão das propriedades supracitadas. Tal modelo foi aplicado a um conjunto de resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores. A metodologia empregada se pautou em duas frentes: a primeira, consistiu na realização de uma revisão sistemática da literatura, culminando na seleção de 52 documentos que abordavam o comportamento resistente do CRRFA; a segunda, foi a busca e identificação de modelos analíticos desenvolvidos para este tipo de concreto e que pudessem ser utilizados para estimar algumas de suas propriedades resistentes. Desta segunda etapa resultou o conjunto de expressões propostas por Ramesh *et al.* (2018) que foram apresentadas, analisadas e discutidas.

Os estudos desenvolvidos até o momento deixam claro que determinadas características dos materiais que compõem a mistura influenciam o comportamento do concreto reciclado reforçado com fibras de aço. A bem reconhecida menor densidade do agregado reciclado interfere consideravelmente na trabalhabilidade e no comportamento elástico do concreto reciclado. Sua maior porosidade afeta a rigidez do concreto, reduzindo a resistência do mesmo à compressão, tração e módulo de elasticidade; estes efeitos aumentam com o aumento no teor de substituição do agregado natural. A incorporação da fibra de aço aumenta a estabilidade da argamassa e, conseqüentemente, diminui a trabalhabilidade da mistura. Entretanto, a capacidade das fibras modificarem o comportamento pós-fissuração do concreto ao atuarem como “costuras” nas regiões fissuradas conferem considerável aumento de resistência pós-fissuração, resultando em comportamento pseudo-dúctil. Indiretamente, as pontes de transferência de tensões criadas pelas fibras também contribuem aprimorando o comportamento do concreto à compressão.

Quando atuando em conjunto no CRRFA, o concreto reciclado e as fibras de aço se mostraram uma combinação valorosa do ponto de vista resistente. Os efeitos negativos atribuídos à maior porosidade do concreto reciclado e que levam à redução na resistência à compressão do material aparentam ser mitigados com a introdução das fibras de aço na mistura. Ainda que este tipo de reforço não seja introduzido no concreto com essa função, os resultados reportados em diversos documentos indicam que essa queda de resistência pode ser contornada com a presença das fibras e, em diversos casos, é possível que ocorra até mesmo um aumento de resistência com o incremento no volume de fibras. Em relação à resistência à tração, a adição de fibras em teores de até 2% se mostraram extremamente vantajosas, aumentando consideravelmente a resistência do concreto reciclado. Volumes de incorporação maiores se mostraram ineficazes dada a dificuldade de distribuição e orientação das fibras na mistura do concreto.

Modelos de previsão são uma notável ferramenta para prever características resistentes ou comportamento do concreto com base em características e/ou propriedades dos materiais que o compõem. Especificamente para o concreto reciclado reforçado com fibras de aço ressalta-se a carência de modelos desenvolvidos para estimar as propriedades resistentes deste tipo de concreto, sendo encontrado em toda a revisão apenas um que se adequasse à análise. Em relação ao modelo de previsão analisado neste estudo, a aplicação das expressões propostas a resultados de 89 misturas de concreto identificadas na revisão sistemática indicou que o modelo para previsão da resistência à compressão foi a mais indicada, com leve subestimação dos resultados experimentais (entre 6,84 e 14,14%). Ressalvas devem ser feitas aos melhores resultados encontrados para concretos com faixa de resistência entre 40 e 50 MPa, mesma faixa de resistência do concreto utilizado para desenvolvimento do modelo. Ainda assim, considerando a elevada variabilidade associada à precisão da resistência à compressão do concreto, o modelo analítico permitiu uma boa aproximação desta propriedade.

A análise do módulo de elasticidade foi prejudicada pela escassez de dados disponíveis para aplicação do modelo analítico, restringindo a análise a apenas 9 misturas de concreto. De todo modo, o modelo apontou, em média, valores 30% inferiores aos experimentais, independentemente da quantidade de agregado reciclado ou das fibras presentes na mistura. A expressão para a resistência à tração do CRRFA foi a que retornou valores mais discrepantes, superestimando consideravelmente os valores experimentais e, aparentemente, se configurando como a menos precisa. Entretanto, o refino nas análises apontou que para concretos com resistências entre 40 e 50MPa e até 50% de agregados reciclados, a expressão pode ser aplicada;

isto porque, nestes intervalos a resistência estimada pelo modelo analítico não ultrapassou, em média, 15,59% da resistência experimental para até 1% de reforço com fibras.

Mediante o exposto, este trabalho demonstra que a combinação entre agregado reciclado e fibras de aço se comprova, não só vantajosa no aspecto ambiental, como também do ponto de vista resistente, apresentando-se como solução aplicável a concretos estruturais. Também neste sentido, o modelo de previsão retornou boas aproximações na estimativa da resistência à compressão. Com isso, espera-se que os apontamentos e conclusões apresentados neste documento possam embasar e impulsionar a continuidade de pesquisas sobre a utilização do concreto reciclado reforçado com fibras de aço.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma revisão sistemática sobre o comportamento resistente do concreto reciclado reforçado com fibras de aço ainda não havia sido realizada. Visando fomentar o desenvolvimento e utilização, em larga escala, desse tipo de concreto e dar seguimento às análises iniciadas neste documento, são destacados alguns pontos que devem ser aprofundados:

- Utilização e implicações do emprego de fibras de aço recicladas como reforço no concreto reciclado;
- Avaliação da aderência de barras de aço a concretos reciclados com fibras de aço;
- Ampliação das investigações das propriedades resistentes do CRRFA, principalmente o módulo de elasticidade;
- Desenvolvimento de modelos numéricos para previsão de propriedades mecânicas do CRRFA fornecendo uma ferramenta mais representativa do material.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Abdelgadir *et al.* Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 555–563, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012>>.

ABBASS, Wasim; KHAN, M. Iqbal; MOURAD, Shehab. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 168, p. 556–569, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164>>.

ABRECON. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/mapa/>>. Acesso em: 12 de jan. de 2022.

ABRELPE. *Panorama 2021*. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em: 12 de jan. de 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R-96: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Committee 544*, p. 66, 2009.

AFROUGHSAKET, Vahid; BIOLZI, Luigi; OZBAKKALOGLU, Togay. Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. *Composite Structures*, v. 181, p. 273–284, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.086>>.

AGHILLOTF, Milad; PALASSI, Massoud; RAMEZANIANPOUR, Amir Mohammad. Mechanical and durability assessment of unconfined recycled concrete aggregates and natural aggregates used in road constructions. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 12, p. 1518–1530, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1701190>>.

AHMED, Tuqa Waleed; ALI, Ahmed A.Mohammed; ZIDAN, Roua Suhail. Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 241, p. 118010, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118010>>.

ALI, Babar *et al.* Synergistic effects of fly ash and hooked steel fibers on strength and durability properties of high strength recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 168, n. August 2020, 2021.

ANGULO, Sérgio Cirelli; FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com agregados reciclados. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. [S.l.]: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. p. 41.

AREZOUMANDI, Mahdi; STEELE, Amanda R.; VOLZ, Jeffery S. Evaluation of the Bond Strengths Between Concrete and Reinforcement as a Function of Recycled Concrete Aggregate Replacement Level. *Structures*, v. 16, n. September, p. 73–81, 2018.

ASLANI, Farhad *et al.* Experimental analysis of fiber-reinforced recycled aggregate self-

compacting concrete using waste recycled concrete aggregates, polypropylene, and steel fibers. *Structural Concrete*, v. 20, n. 5, p. 1670–1683, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15115: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos*. Rio de Janeiro: ABNT., 2004a

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassa e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT., 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15530: fibras de aço para concreto: requisitos e métodos de ensaio*. [S.l: s.n.], 2019

BAEZA, F. J. *et al.* Influence of recycled slag aggregates on the conductivity and strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement mortars. *Construction and Building Materials*, v. 184, p. 311–319, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.218>>.

BAI, Guoliang *et al.* An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, v. 240, p. 117978, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117978>>.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, Kishore; PAREEK, V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 9, n. 1–2, p. 109–126, 1993.

BEKAERT. Fibras de aço para reforço do concreto. Manual Técnico.

BELTRÁN, Manuel G. *et al.* Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths. *Journal of Cleaner Production*, v. 79, p. 124–133, 2014.

BENCARDINO, Francesco *et al.* Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression. n. March, p. 255–263, 2008.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. *Fibre reinforced cementitious composites*. United Kingdom: Elsevier, 2019.

BRECCOLOTTI, Marco; MATERAZZI, Annibale Luigi. Structural reliability of bonding between steel rebars and recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 927–934, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.017>>.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. *IS:383. Indian Standard Coarse and Fine aggregate for Concrete- Specification*. Nova Dehli: [s.n.], 2016

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 10, p. 1037–1049, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>>.

CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering C: Introduction*. [S.l: s.n.], 2002.

CARNEIRO, Jodilson Amorim *et al.* Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 46, p. 65–72, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.006>>.

CHABOKI, Hamid Reza *et al.* Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams. *Construction and Building Materials*, v. 186, p. 400–422, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.132>>.

CHABOKI, Hamid Reza *et al.* Shear behaviour of concrete beams with recycled aggregate and steel fibres. *Construction and Building Materials*, v. 204, p. 809–827, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.130>>.

CHAN, Ricardo; LIU, Xingzi; GALO BARDES, Isaac. Parametric study of functionally graded concretes incorporating steel fibres and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 242, p. 118186, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118186>>.

CHAND, Madduru Sri Rama *et al.* Mix model for self-compacting concrete with recycled aggregate. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, v. 170, n. 2, p. 131–142, 2017.

CHEN, G. M. *et al.* Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 1–15, 2014.

CHEN, G. M. *et al.* Fracture behaviour of steel fibre reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 272–286, 2016.

CHOI, Yeol; YUAN, Robert L. Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 8, p. 1587–1591, 2005.

CORINALDESI, Valeria. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 9, p. 1616–1620, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>>.

CORINALDESI, Valeria; MORICONI, Giacomo. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 8, p. 2869–2876, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>>.

CRUZ, Pedro M. F. A. N. Da. *Modelação de microestruturas de material periódico para estudo de concentração de tensões*. 2018. Universidade Nova de Lisboa, 2018.

EFNARC. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. European Federation of National Associations Representing for Concrete. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Specification+and+Guidelines+for+Self-Compacting+Concrete#0>>.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

FANG, Sheng En; HONG, Hua Shan; ZHANG, Pei Hui. Mechanical property tests and strength formulas of basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Materials*, v. 11, n. 10, 2018.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, p. 68, 2000.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues De. *Concreto reforçado com fibras*. 2011. 256 f. Tese (Livre docência). Universidade de São Paulo, 2011.

FLOREA, M V A; BROUWERS, H J H. Cement and Concrete Research Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use. *Cement and Concrete Research*, v. 52, p. 11–21, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.005>>.

FOLINO, Paula; XARGAY, Hernán. Recycled aggregate concrete - Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. *Construction and Building Materials*, v. 56, p. 21–31, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.073>>.

GAO, Danying *et al.* Behavior analysis and strength prediction of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete column under axial compression. *Construction and Building Materials*, v. 290, p. 123278, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123278>>.

GAO, Danying; YAN, Huanhuan; *et al.* Bond strength and prediction model for deformed bar embedded in hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 265, p. 120337, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120337>>.

GAO, Danying; ZHANG, Lijuan; *et al.* Durability of steel fibre-reinforced recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 232, p. 117119, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117119>>.

GAO, Danying; ZHANG, Lijuan. Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 159, p. 126–136, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.073>>.

GAO, Danying; ZHANG, Lijuan; NOKKEN, Michelle. Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete designed with equivalent cubic compressive strength. *Construction and Building Materials*, v. 141, p. 235–244, 2017a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.136>>.

GAO, Danying; ZHANG, Lijuan; NOKKEN, Michelle. Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear. *Cement and Concrete Composites*, v. 79, p. 1–8, 2017b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.006>>.

GERIN, Mayara Turi. *Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: Efeito do teor de substituição e da forma*

de aplicação da força. 2020. 153 f. Universidade Federal de São Carlos, 2020.

GHALEHNOVI, Mansour *et al.* Flexural strength enhancement of recycled aggregate concrete beams with steel fibre-reinforced concrete jacket. *Engineering Structures*, v. 240, n. December 2019, p. 112325, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112325>>.

GHONEIM, Mohamed *et al.* Shear strength of fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Materials*, v. 13, n. 18, 2020.

GHORBEL, Elhem; WARDEH, George; FARES, Hanaa. Mechanical and fracture properties of recycled aggregate concrete in design codes and empirical models. *Structural Concrete*, v. 9, n.6, p. 2156-2170, 2019.

GHORPADE, Vaishali G.; SUDARSANA RAO, H. Strength and permeability characteristics of Fibre reinforced recycled aggregate concrete with different fibres. *Nature Environment and Pollution Technology*, v. 9, n. 1, p. 179–188, 2010.

GÓMEZ-SOBERÓN, José M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, 2002.

GUERRA, M. *et al.* Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, v. 72, p. 113–123, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.081>>.

GÜNEYISI, Erhan *et al.* Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 622–630, 2016.

HANIF, Asad *et al.* Early-age behavior of recycled aggregate concrete under steam curing regime. *Journal of Cleaner Production*, v. 152, p. 103–114, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.107>>.

HE, Wenchang *et al.* Experimental investigation on the mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 261, p. 120488, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120488>>.

HILLES, Mahmoud Mazen; ZIARA, Mohammed M. Mechanical behavior of high strength concrete reinforced with glass fiber. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 22, n. 3, p. 920–928, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.003>>.

HOLSCHEMACHER, K.; MUELLER, T.; RIBAKOV, Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, v. 31, n. 5, p. 2604–2615, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>>.

ITALIAN BUILDING CODE. Norme Tecniche per le Costruzioni. p. 428, 2008. Disponível em: <<http://www.gazzettaufficiale.it/>>.

JAYASURIYA, Anuruddha *et al.* Development and statistical database analysis of hardened

concrete properties made with recycled concrete aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 164, n. August 2020, p. 105121, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105121>>.

JAYASURIYA, Anuruddha; ADAMS, Matthew P.; BANDELT, Matthew J. Understanding variability in recycled aggregate concrete mechanical properties through numerical simulation and statistical evaluation. *Construction and Building Materials*, v. 178, p. 301–312, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.158>>.

KACHOUH, Nancy; EL-HASSAN, Hilal; EL-MAADDAWY, Tamer. Effect of steel fibers on the performance of concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand. *Construction and Building Materials*, v. 213, p. 348–359, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.087>>.

KACHOUH, Nancy; EL-HASSAN, Hilal; EL MAADDAWY, Tamer. The use of steel fibers to enhance the performance of concrete made with recycled aggregate. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, v. 1, 2019.

KANNAM, Praveen; RAO SARELLA, Venkateswara; KUMAR PANCHARATHI, Rathish. Influence of Recycled Aggregate on Shear Behavior of Steel Fibrous SCC. *Journal of Materials and Engineering Structures*, v. 5, p. 185–205, 2018.

KAPOOR, Kanish; SINGH, S. P.; SINGH, Bhupinder. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 67–76, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>>.

KAZMI, Syed Minhaj Saleem *et al.* Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 857–868, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.161>>.

KHOURY, Eliane *et al.* Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. *Construction and Building Materials*, v. 175, p. 705–713, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163>>.

KHOURY, Eliane; CAZACLIU, Bogdan; REMOND, Sébastien. Impact of the initial moisture level and pre-wetting history of recycled concrete aggregates on their water absorption. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 50, n. 5, 2017.

KOUSHKBAGHI, Mahdi *et al.* Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 266–275, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.224>>.

LEITE, Mônica Batista. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. 290 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LI, Yue; LI, Yaqiang. Evaluation of elastic properties of fiber reinforced concrete with homogenization theory and finite element simulation. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 301–309, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.134>>.

LIAO, Wen Cheng; PERCEKA, Wisena; LIU, En Jui. Compressive stress-strain relationship of high strength steel fiber reinforced concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 13, n. 8, p. 379–392, 2015.

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 33, n. 9, p. 574–580, 2000.

LIU, Qiong; XIAO, Jianzhuang; SUN, Zhihui. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 10, p. 1050–1057, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.007>>.

LIU, Zhenzhen *et al.* Flexural behavior of steel fiber reinforced self-stressing recycled aggregate concrete-filled steel tube. *Journal of Cleaner Production*, v. 274, 2020.

LV, Liangsheng *et al.* Bond behavior between recycled aggregate concrete and deformed bars under uniaxial lateral pressure. *Construction and Building Materials*, v. 185, p. 12–19, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.226>>.

MEESALA, Chakradhara R. Influence of different types of fiber on the properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, v. 20, n. 5, p. 1656–1669, 2019.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *CONCRETO - Microestrutura, propriedades e materiais*. 2° Edição ed. [S.l.]: IBRACON, 2014.

MOHAMMED, Saif I.; NAJIM, Khalid B. Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. *Structures*, v. 23, n. September 2019, p. 34–43, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.010>>.

MOHOD, Milind V. Performance of steel fiber-reinforced concrete. *International Journal of Engineering and Science*, v. 1, n. 12, p. 01–04, 2012.

MOHSENI, Ehsan *et al.* Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. *Journal of Cleaner Production*, v. 168, p. 605–613, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.070>>.

MONTGOMERY, D G. WORKABILITY AND COMPRESSIVE STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE. 1998.

NALANTH, N.; VENKATESAN, P. Vincent; RAVIKUMAR, M. S. Evaluation of the fresh and hardened properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete using recycled aggregates as a replacement material. *Advances in Civil Engineering*, v. 2014, 2014.

NAZARIMOFRAD, Ebrahim; SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed; NILI, Mahmoud. Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 6, n. 1, p. 54–68, 2017.

NITESH, K. J.N.Sai; RAO, S. Venkateswara; KUMAR, P. Rathish. An experimental investigation on torsional behaviour of recycled aggregate based steel fiber reinforced self compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 22, p. 242–251, 2019. Disponível

em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.12.011>>.

ORTIZ, J. A. *et al.* Steel-fibre-reinforced self-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 230–241, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.188>>.

PACHECO, J. *et al.* Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 110–120, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>>.

PARK, Seung Bum; SEO, Dae Seuk; LEE, Jun. Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 9, p. 1846–1854, 2005.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 803–814, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.007>>.

PICKEL, Daniel. Recycled concrete aggregate: influence of aggregate pre-saturation and curing conditions on the hardened properties of concrete. p. 189, 2014.

POON, C S *et al.* Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. v. 34, p. 31–36, 2004.

PRINCE, John R. M.; SINGH, Bhupinder. Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 852–862, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.031>>.

PRINCE, M. John Robert; SINGH, Bhupinder. Bond behaviour of normal- and high-strength recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, v. 16, n. 1, p. 56–70, 2015.

QURESHI, Liaqat Ali; ALI, Babar; ALI, Asad. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 263, p. 120636, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120636>>.

RAFI, M. M. Study of Bond Properties of Steel Rebars with Recycled Aggregate concrete. Experimental Testing. *Strength of Materials*, v. 50, n. 6, p. 937–950, 2018.

RAHAL, Khaldoun. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, v. 42, n. 1, p. 407–415, 2007.

RAMESH, Rakul Bharatwaj; MIRZA, Olivia; KANG, Won Hee. Mechanical properties of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, v. 20, n. 2, p. 745–755, 2018.

RAZZAGHI, Hossein; MADANDOUST, Rahmat; AGHABARATI, Hassan. Point-load test and UPV for compressive strength prediction of recycled coarse aggregate concrete via generalized GMDH-class neural network. *Construction and Building Materials*, v. 276, p. 122143, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122143>>.

ROESLER, Jeffery *et al.* COE Report No. 34: Properties of recycled concrete aggregates for airfield rigid pavements. n. 34, p. 1–98, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2142/45894>>.

SALGADO, Fernanda de Andrade; SILVA, Flávio de Andrade. Properties of recycled aggregates from different composition and its influence on concrete strength. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 6, p. 1–16, 2021.

SAMARAKOON, S. M.Samindi M.K. *et al.* Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials*, v. 11, p. e00259, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>>.

SANTANA, Igor Vinicius. *Estudo de influência das fibras metálicas no comportamento da aderência entre barras de aço e concretos de diferentes classes de resistência*. 2014. 248 f. Universidade de São Paulo, 2014.

SEARA-PAZ, Sindy *et al.* Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 47, n. 1–2, p. 323–334, 2014.

SENARATNE, Sepani *et al.* Structural applicability of steel fibre-recycled aggregate concrete in construction. *Journal of Engineering, Design and Technology*, v. 16, n. 6, p. 959–972, 2018.

SENARATNE, Sepani *et al.* The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibres as a sustainable, structural material. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2318–2327, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.041>>.

SILVA, Leonária Araújo *et al.* Modelagem preditiva de propriedades mecânicas em concretos reforçados com fibra de aço utilizando redes neurais artificiais. *Ambiente Construído*, v. 22, n. 2, p. 215–232, 2022.

SILVA, Rui Vasco *et al.* Real-scale applications of recycled aggregate concrete. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, p. 573–589, 2018.

SILVA, Rui Vasco; DE BRITO, Jorge; DHIR, Ravindra Kumar. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2171–2186, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064>>.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. *FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS - SMITH & HASHEMI.pdf*. . [S.l: s.n.] , 2012

SONG, P. S.; HWANG, S. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 9, p. 669–673, 2004.

SU, Q. Strengths of recycled concrete added with steel fiber. *Archives of Civil Engineering*, v. 66, n. 3, p. 693–703, 2020.

TABSH, Sami W.; ABDELFATAH, Akmal S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>>.

TAN, Yan; ZHOU, Chenxu; ZHOU, Jinzhi. Influence of the Steel Fiber Content on the Flexural Fatigue Behavior of Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Civil Engineering*, v. 2020, 2020.

THOMAS, C. *et al.* Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 1054–1065, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106>>.

THOMAS, Job; THAICKAVIL, Nassif Nazeer; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. *Journal of Building Engineering*, v. 19, n. March, p. 349–365, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2018.05.007>>.

TOGHROLI, Ali *et al.* Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers. *Construction and Building Materials*, v. 252, p. 118997, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118997>>.

VAN CHANH, Nguyen. *Steel fiber reinforced concrete*. 2004. 108–116 f. Ho Chi Minh City University of Technology, 2004.

VERIAN, Kho Pin; ASHRAF, Warda; CAO, Yizheng. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 133, n. October 2017, p. 30–49, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>>.

VIEIRA, Geilma Lima; DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. *Ambiente Construído*, v. 4, n. 4, p. 47–63, 2004.

WANG, Junjie *et al.* Combined use of silica fume and steel fibre to improve fracture properties of recycled aggregate concrete exposed to elevated temperature. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, n. 3, p. 862–877, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10163-020-00990-y>>.

WANG, Qiao Huan *et al.* Axial Compressive Behavior of Steel Fiber-Reinforced Recycled Coarse Aggregate Concrete-Filled Short Circular Steel Columns. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2021, 2021.

WANG, Wei Lun; KOU, Shi Cong; XING, Feng. Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 187–193, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.065>>.

WU, Min *et al.* Seismic performance of precast short-leg shear wall using a grouting sleeve connection. *Engineering Structures*, v. 208, n. September 2019, p. 110338, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110338>>.

XIAO, Jianzhuang *et al.* An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 364–383, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>>.

XIAO, Jianzhuang *et al.* Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel fibres. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 13, n. 3, p. 725–740, 2019.

XIAO, Jianzhuang; LI, Jiabin; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1187–1194, 2005.

XIE, Jian He *et al.* Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, v. 79, p. 263–272, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036>>.

XIE, Jianhe; ZHANG, Zhen; *et al.* Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, v. 184, p. 752–764, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.035>>.

XIE, Jianhe; HUANG, Liang; *et al.* Experimental study on the compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete modified with silica fume and fibres. *Construction and Building Materials*, v. 178, p. 612–623, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.136>>.

YAZICI, Şemsi; INAN, Gözde; TABAK, Volkan. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 6, p. 1250–1253, 2007.

ZAHARIEVA, Roumiana *et al.* Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 2, p. 223–232, 2003.

ZHANG, Hai Long; PEI, Chang Chun. Flexural properties of steel fiber types and reinforcement ratio for high-strength recycled concrete beams. *Advances in Structural Engineering*, v. 20, n. 10, p. 1512–1522, 2017.

ZHAO, Zhihui *et al.* Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 191–196, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.032>>.

ZHENG, Chaocan *et al.* Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, v. 9, n. April, p. 1317–1322, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>>.

ZOLLO, Ronald F. Fiber-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n. 2, p. 107–122, 1997.

ZONG, Shuai *et al.* Stress-strain behaviour of steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete under axial tension. *Journal of Cleaner Production*, v. 278, p. 123248, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123248>>.